

А. В. ШИЛЕЙКО, Т. И. ШИЛЕЙКО

КИБЕРНЕТИКА БЕЗ МАТЕМАТИКИ

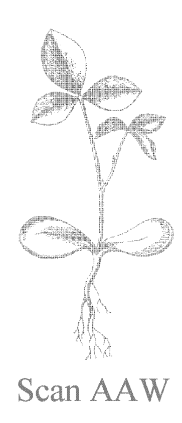


МАССОВАЯ
РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 818

А. В. ШИЛЕЙКО, Т. И. ШИЛЕЙКО

КИБЕРНЕТИКА БЕЗ МАТЕМАТИКИ



Scan AAW



«ЭНЕРГИЯ» • МОСКВА 1973

6Ф0.1
Ш55

УДК 62—52

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А И., Борисов В. Г., Бурдейный Ф. И., Бурлянд В. А., Ванеев В. И., Геништа Е. Н., Демьянов И. А., Жеребцов И. П., Канаева А. М., Корольков В. Г., Куликовский А. А., Смирнов А. Д., Тарасов Ф. И., Шамшур В. И.

Шилейко А. В. и Шилейко Т. И.

Ш55 Кибернетика без математики, М., «Энергия», 1973

144 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека, вып. 818).

Книга популярно рассказывает о некоторых главных аспектах современной автоматики и рассчитана на широкий круг радиолюбителей, а также читателей, интересующихся проблемами современной автоматики

$\frac{0345\text{-}063}{051(01)\text{-}73}$ 365-72 6Ф0.1

АЛЕКСЕЙ ВОЛЬДЕМАРОВИЧ ШИЛЕЙКО
ТАМАРА ИВАНОВНА ШИЛЕЙКО

КИБЕРНЕТИКА БЕЗ МАТЕМАТИКИ

Редактор А. П. Алешкин
Обложка художника А. А. Иванова
Технический редактор Н. А. Галанчева
Корректор И. А. Володяева

Сдано в набор 14/IV 1972 г.
Подписано к печати 22/XI 1972 г. Т-19610
Формат 84×108 1/32. Бумага типографская № 3
Усл. печ. л. 7,56. Уч.-изд. л. 11,04
Тираж 60 000 экз. Зак 316 Цена 45 коп.

Издательство «Энергия».
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Владимирская типография Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18б.

ОТ АВТОРОВ

О кибернетике написано много солидных монографий и, пожалуй, еще больше научно-популярных книг, брошюр и статей. Стало традицией использовать прилагательное «кибернетический» повсюду, где для этого есть хоть малейшие основания. Буквально на каждом шагу мы сталкиваемся сейчас с кибернетическими цехами и кибернетическими системами резервирования авиационных билетов, с кибернетическими танцорами и кибернетическими кухнями, кибернетическими игроками и кибернетическими музыкантами. Что это — влияние моды или на самом деле молодая наука за неполные 30 лет своего существования успела так глубоко проникнуть во все области нашей жизни? А может быть, все-таки правы те осторожные ученые, которые утверждают, что кибернетика есть всего лишь абстрактная научная теория?

Кибернетика — это наука о процессах управления. С процессами управления мы сталкиваемся повсюду, где совершается та или иная организующая деятельность, где из беспорядка создается порядок, будь то строительство дома или рождение новых полимерных материалов, управление уличным движением или написание литературного произведения. Но это совсем не значит, что целое научное направление или отрасль промышленности следует относить к разряду кибернетических только на том основании, что наряду со многими другими здесь встречаются и процессы, закономерности протекания которых изучает наука кибернетика.

Можно подойти к вопросу и с другой стороны. Нужно ли вообще спорить о терминологии? Ведь если взять, например, автомат, пропускающий пассажиров в метро, то он будет продолжать работать и приносить пользу, освобождая человека от трудной и неинтересной работы, независимо от того, назовем мы его кибернетическим или нет. Вообще говоря, о терминологии спорить бессмысленно. Эта истина была известна людям задолго до появления кибернетики. Но есть одно довольно существенное, на наш взгляд, обстоятельство. Сейчас стало традицией: писать о кибернетике — значит, писать о вычислительных машинах, устройствах распознавания образов, системах управления производством, искусственных игроках в шахматы и о многом другом, в силу своей исключительной сложности трудно поддающемся популяризации. Поэтому большинство популярных книг о кибернетике скорее отвечает на вопрос, что может современная техника управления, а не на вопрос, почему или как достигаются эти возможности. Но именно общность процессов управления позволяет продемонстрировать основные идеи кибернетики на очень простых и понятных всем примерах. Поэтому мы и поставили себе целью написать серию очерков о мамонтах и мыле, о веревке и автомобиле, о лягушке и швейной машине, а в общем — о кибернетике.

В тексте книги читатель встретит несколько формул. Означает ли это, что авторы обманули читателя, назвав свою книгу «Кибернетика без математики»? Конечно, нет. Ведь формулы — это просто язык, позволяющий в краткой форме описывать различные факты. Если описывается, например, тот факт, что квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов, то такая формула, конечно, будет математической. Но если описываемый факт не имеет никакого отношения к математике, то и сама формула будет только тем, чем она есть на самом деле — фразой, записанной на некотором своеобразном языке.

Во вступлениях к популярным книгам принято указывать, какая подготовка и в каких именно областях знания предполагается у читателя. Мы адресуем эту книгу в первую очередь тем, кто участвовал в увлекательных приключениях Гека Фина и Тома Сойера, кто много размышлял над судьбой Маленького Принца Сент-Экзюпери, тем, кто из путешествий в волшебном мире русских сказок вынес прочное убеждение, что «сказка ложь, да в ней намек — добрым молодцам урок».

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность проф. Э. И. Гитису за многочисленные ценные замечания и художнику Э. П. Путинцеву, который первый понял и выразил в замечательных рисунках сокровенные замыслы авторов.



Трудно представить себе занятие более неблагодарное, чем попытки отвечать на такие, например, вопросы, что такое кибернетика или что такое теория относительности? В течение довольно долгого времени мы ограничивались простейшим из возможных ответов, мол, кибернетика — это наука, считая, что любые дальнейшие уточнения только затемнят существо дела. Возможно, так продолжалось бы и дальше и тогда эта книга никогда не увидела бы света, если бы не одна история, которую мы расскажем здесь.

ВМЕСТО ПРЕДИСЛОВИЯ

Все началось с того, что в нашем стареньком «Москвиче» отказали тормоза. Случилось это на даче в ста километрах от Москвы. Нехитрое обследование показало, что отремонтировать тормозную систему нашей колымаги можно только, сняв предварительно задний левый тормозной барабан. Эту операцию мы бы выполнили в течение двух минут, если бы в нашем распоряжении был «съемник» — простейшее приспособление, состоящее из винта и фигурной гайки с двумя нарезками. Но съемника у нас не было. Не оказалось

его и на ближайшей автобазе и у всех доступных коллег-автомобилистов, а без съемника барабан сниматься не хотел. Не помогли никакие ухищрения, начиная от простейших — типа подковыривания отверткой — и кончая весьма хитроумным приспособлением, состоящим из домкрата, березового полена и стального троса. К слову сказать, в результате последних экспериментов домкрат оказался безнадежно испорченным.

Потратив день в бесплодных усилиях, мы отправились на почту и уже на другое утро с волнением встречали на станции знаменитого Николая Ивановича, аса-механика, спасшего на своем веку бесчисленное количество незадачливых автомобилистов-любителей.

По дороге со станции разговор шел, в основном, о погоде и о красотах окружающей местности. Николай Иванович бодро размахивал пустыми руками и глядел по сторонам, а нас все время мучил вопрос, где же прячет он драгоценный съемник, необходимость в котором стала нам к тому времени совершенно очевидной. Не прояснился этот вопрос и во время завтрака, когда обсуждались достоинства нашей речки как возможного рыболовного угодья.

Наконец, настал торжественный момент и мы подошли к «Москвичу», грустно опиравшемуся на три колеса и стопку сложенных кирпичей. Однако вместо того чтобы с ловкостью фокусника извлечь из недр своей старенькой спецовки вожделенный съемник, Николай Иванович взял молоток и с задумчивым видом начал похаживать вокруг машины. Походив так несколько минут, он нагнулся и начал легонько постукивать молотком по какому-то месту, которое, на наш взгляд, не могло иметь ни малейшего отношения к злополучному левому барабану.

И тут произошло чудо. Да, да, именно чудо! Никакое другое слово русского языка не годится для описания события, свидетелями которого мы стали. Тот самый барабан, для снятия которого, по нашему глубокому убеждению, не хватило бы никакой на свете силы, легонько шелохнулся и сам (именно сам, поскольку невозможно было уловить никакой разумной связи между тем, что происходило на наших глазах, и легкими постукиваниями где-то в области правой рессоры) стал постепенно сползать, пока не свалился на землю.

Трудно сказать теперь, что выражали наши лица — восхищение или суеверный ужас. Ясно одно, выражение это не оставило Николая Ивановича равнодушным, и начался фейерверк чудес. Сами собой открывались двери, отвинчивались гайки, причем одна из них, наиболее заржавевшая, не только отвинтилась, но и поползла по резьбе вверх, нарушая привычные нам представления о трении, а заодно и закон всемирного тяготения.

Что касается нас, то мы могли бы смотреть на эти чудеса еще очень долго, но Николаю Ивановичу скоро все надоело. Не прошло и десяти минут, как он равнодушно присел на корточки у ворот гаража, закурил «Прибой» и небрежно бросил горящую спичку в стоящее поблизости ведро с бензином. Вряд ли нужно добавить, что спичка зашипела и погасла.

Собственно, миссия Николая Ивановича на этом была закончена, и он, прихватив удочку, отправился на речку. А мы, вырывая друг у друга молоток, ринулись к «Москвичу». Но не тут-то было! Наверное, не осталось такого квадратного миллиметра поверхности, по которой бы мы ни постукивали молотком — слабо и посильнее, пореже и почаще. Чары исчезли! Ни одна деталь, даже самая маленькая, так и не сдвинулась с места. Прошло довольно много времени,

пока, поняв необоснованность своих претензий на звание чародеев, мы успокоились и занялись более скучным, но явно более полезным делом — стали промывать тормозной цилиндр и менять резиновые манжеты. Вечером мы катили в Москву на отремонтированном «Москвиче».

Скажем прямо, ни тогда, ни впоследствии мы так и не научились вызывать чудодейственный «эффект Николая Ивановича». Зато пережитое дало нам возможность, не задумываясь, отвечать на вопрос и кибернетике. Кибернетика — это наука о том, по какому месту надо постукивать молотком.

История развития и становления науки кибернетики весьма своеобразна. Обычно всякая новая научная теория либо принималась сразу и безоговорочно, либо (что происходило гораздо чаще) отвергалась и игнорировалась до тех пор, пока достаточное количество экспериментальных фактов и теоретических поверок не подтверждали ее справедливости. Кибернетику же не то чтобы не признали, но с самого начала стали толковать неправильно. Во всяком случае, количество таких неверных толкований намного больше, чем для любой другой физической теории.

Сам творец кибернетики Норберт Винер назвал этим словом теорию процессов управления и связи в животном и машине. По-видимому, слово «управление» виной тому, что в ведение кибернетики очень скоро были переданы такие обширные области, как автоматика и вычислительная техника. Появился даже специальный термин «техническая кибернетика». Остается только удивляться, почему в таком случае другое слово, «связь», также присутствующее в определении Винера, не заставило передать в ведение технической кибернетики также и телефонию, радиотехнику, телевидение, а заодно (почему бы и нет!) почтовую связь. Винер ставил перед собой значительно более скромную задачу — он претендовал всего лишь на исследование совершенно определенных процессов, а именно процессов управления и связи, и на демонстрацию общности этих процессов независимо от того, проявляются они в искусственно созданных или в естественных системах. Чтобы сделать более понятной сущность процессов управления, вернемся к «эффекту Николая Ивановича».

Конечно, в этом «эффекте» нет ничего чудесного Более того, подобными приемами пользуется каждый мало-мальски опытный слесарь, совершенно не подозревая при этом, что тут он действительно имеет дело с кибернетикой. Для объяснения «эффекта Николая Ивановича» рассмотрим сначала очень простой пример. Тело лежит на наклонной плоскости. Как это хорошо известно всем, кто учился в седьмом классе, на тело действует сила веса, направленная вертикально вниз. Эта сила по правилу параллелограмма может быть разложена на две силы, одна из которых направлена перпендикулярно, а другая параллельно наклонной плоскости. Последняя вызывает соскальзывание тела вниз, но этому мешает сила трения, которая в свою очередь пропорциональна силе давления тела на наклонную плоскость. Если сила трения достаточно велика, тело на наклонной плоскости будет оставаться неподвижным.

Сила трения зависит от качества поверхности. Дело в том, что поверхность наклонной плоскости и поверхность лежащего на ней тела никогда не бывают идеально гладкими, даже если их хорошо отполировали. Соприкасающиеся друг с другом поверхности как бы цепляются друг за друга, что и вызывает появление силы трения. Такое сцепление тем больше, чем сильнее сдавлены поверхности.

Будем теперь легонько постукивать по какой-нибудь точке наклонной плоскости. Если плоскость выполнена из упругого материала, например из металла, то такое постукивание вызовет появление волн сжатия, распространяющихся вдоль плоскости. Если точка, по которой мы постукиваем, а также сила самих ударов и их частота выбраны правильно, то волна пройдет как раз в том месте, где находится тело, и это приведет к тому, что шероховатости двух соприкасающихся плоскостей выйдут из зацепления. Тело сдвинется, потеряет устойчивость и, начав двигаться, приобретет кинетическую энергию, которая будет способствовать его дальнейшему движению. Таким образом, постукивая по наклонной плоскости, можно заставить тело двигаться, а если делать это очень искусно, то даже в заданном направлении (конечно, вниз, а не вверх). Если вспомнить теперь, что нарезки винта и гайки представляют собой две сопряженные наклонные плоскости, роль веса в данном случае играет упругая сила винта, деформированного при завинчивании гайки, и эта сила может быть направлена не обязательно вниз, а в любом направлении, совпадающем с направлением оси винта, то объяснение «эффекта Николая Ивановича» можно считать завершенным.

Так что же — вся кибернетика сводится только к движению тел по наклонным плоскостям и гаек по резьбам? Конечно, нет. Просто рассмотренные примеры удобны для выявления некоторых общих принципов. А принципы эти состоят в следующем. Процессы управления проявляются в системе, обладающей некоторым собственным запасом энергии. В нашем случае — это потенциальная энергия тела, лежащего на наклонной плоскости, или потенциальная энергия упругой деформации винта. Запас потенциальной энергии достаточен для того, чтобы в системе совершилось некоторое движение. Оно может совершиться и само собой без всякого влияния извне. Сущность процессов управления заключается в том, чтобы это движение совершилось некоторым нужным образом или, может быть, в нужный момент времени. И обязательное условие: на само управление (постукивание) должна быть затрачена энергия, значительно меньшая энергии, вызывающей движение.

Процессы управления исключительно многообразны. Они совершаются как в искусственно созданных системах — машинах, так и в естественных системах — животных и растениях.

Вот еще один пример. В ноябре 1780 г. жена профессора анатомии Луиджи Гальвани вошла в комнату, где ее муж занимался изучением нервной системы лягушки. Одну из препарированных лягушек Гальвани по рассеянности положил на стол электрической машины. Злые языки утверждают даже, что эта лягушка совсем не была предназначена для опытов — профессор решил сварить из нее и нескольких ее товарок бульон. Так или иначе, но жена с ужасом увидела, что в момент проскакивания искры между шариками электрической машины лапки лягушки судорожно подергиваются, и сообщила об этом мужу. Он провел серию экспериментов, и вскоре выяснилось, что если повесить препарированные лягушачьи лапки на медный крюк так, чтобы этот крюк касался спинного нерва, а сам крюк зацепить за железную решетку забора, то лапки будут подергиваться каждый раз, когда они коснутся любых частей этой решетки. Полная аналогия с «эффектом Николая Ивановича»! При этом не надо даже постукивать. Для того чтобы вызвать сокращение лягушачьих лапок, достаточно прикоснуться (мы теперь это хорошо знаем), к спинному нерву проводником, находящимся под напряжением.

Как раз то, что между «эффектом Николая Ивановича» и эффектом Гальвани имеется полная аналогия, и вызвало наиболее яростные споры вслед за выходом в свет книги Норберта Винера «Кибернетика». Причина этих споров чисто психологическая. Действительно, без малого через 200 лет после открытия Гальвани у нас не вызывает никаких сомнений тот факт, что мускулы, которые для того и созданы, чтобы сокращаться, сокращаются, а сигналом к такому сокращению служит раздражение нерва, который для того и создан, чтобы передавать раздражения. Совсем иначе обстоит дело с тормозным барабаном «Москвича», который создан совсем не для того, чтобы сваливаться с оси, скорее совсем наоборот, а уже если ему и нужно быть снятым, то с помощью специального съемника, а не каких-то там постукиваний. Да и вообще, как можно сравнивать столь тонкую организацию, как мышцы и нервы (ведь и сам человек — царь природы — имеет ту же начинку), с какими-то там бездушными кусками железа.

И все же аналогия налицо. Во всяком случае, аналогия тех процессов, которые и являются сейчас предметом нашего рассмотрения. И в том и в другом случае перед нами система, обладающая собственным запасом энергии. У лягушачьих лапок — это энергия химическая и накоплена она в мышечных клетках. И в том и в другом случае энергия потенциальная превращается в энергию кинетическую (движение) не сама по себе, а в результате воздействия извне. Наконец, и в том и в другом случае энергия управляющего воздействия недостаточна, чтобы самостоятельно вызвать движение. Управляющее воздействие только создает условия для превращения накопленной системой потенциальной энергии в энергию кинетическую.

Если уж говорить об отличиях, то главное из них, на наш взгляд, состоит в том, что эффект Гальвани может вызвать любой, кто знает, где находится спинной нерв у лягушки. С «эффектом Николая Ивановича» дело обстоит значительно сложнее. Всей мощи современной науки недостаточно для того, чтобы чисто теоретическим путем определить точку, по которой надо стучать. Мы можем только объяснить наблюдаемое явление, что и было сделано выше. А чтобы вызвать его, нужно накопить огромный опыт, да и этого зачастую оказывается недостаточно. Распространение упругих колебаний в телах сложной формы, да еще, как это было в нашем случае, состоящих из нескольких сопряженных частей, — процесс исключительно сложный, и в настоящее время отсутствует теория, позволяющая точно предсказать его во всех деталях.

Говоря это, мы отнюдь не утверждаем, что задний мост автомобиля сложнее мышечной и нервной структуры лягушачьих лапок. Вообще сами понятия «сложнее» и «проще» бессмысленны, когда речь идет о столь различных вещах. Мы просто хотели подчеркнуть здесь то обстоятельство, что лапки лягушки, равно как и любые другие мышечные структуры, представляют собой механизм, специально сконструированный природой для того, чтобы в нем совершались процессы управления. Поэтому, однажды поняв принцип действия этого механизма, легко вызвать соответствующий эффект.

Задний мост автомобиля также представляет собой механизм, но конструкторы этого механизма не заложили в него способности самосъема тормозных барабанов. Поэтому «эффект Николая Ивановича» следует рассматривать как «эффект» побочный. Но важнейший вывод из двух рассмотренных примеров состоит именно в том, что процессы управления суть объективные процессы природы и прояв-

ляются не только тогда, когда они были заранее запланированы. Изучением общих законов протекания этих процессов и занимается наука кибернетика.

До сих пор мы говорили только о процессах управления и ничего не сказали о связи. Связь — это совокупность всевозможных средств, обеспечивающих передачу сигналов на расстояние. Управление немыслимо без связи. В наших примерах связь осуществлялась либо нервным волокном (явно), либо корпусом заднего моста, по которому распространялась упругая волна (менее явно). Очевидно, что процессы связи играли в обоих примерах столь же важную роль, как и процессы управления.

Эта книга имеет особенность — она написана двумя авторами. Вопрос о том, как пишут вдвоем, относится к категории вопросов, отмеченных выше. Ни братья Гонкуры, ни братья Стругацкие, а также Ильф и Петров и другие авторские пары не смогли дать на этот вопрос удовлетворительный ответ, во всяком случае публично. Но ясно одно, если пишешь книгу вдвоем, нужно хотя бы договориться, о чем писать. Результат этой нелегкой процедуры и нашел свое отражение в предыдущих строках. Это книга о кибернетике, иначе говоря, о том, по какому месту надо постукивать молотком. Но подобное определение содержит очевидный изъян: в нем ничего не говорится о том, зачем надо постукивать. Действительно, когда природа конструировала нервную систему лягушки, она ни в коей мере не предназначала эту систему для того, чтобы ее использовали в качестве электрического измерительного прибора. Аналогичным образом, конструктор заднего моста автомобиля, как мы уже указывали, не прилагал никаких усилий к тому, чтобы тормозные барабаны, а заодно и прикрепленные к ним колеса сваливались при случайном постукивании. Одним словом, вопрос о цели производимых действий остался за рамками всего проведенного до сих пор рассмотрения. А это одна из важнейших проблем кибернетики.

Чтобы как-то прояснить нашу мысль, рассмотрим еще один пример. Пусть на краю стола лежит металлический шарик. Если легонько подтолкнуть его в направлении к краю, шарик упадет вниз. Можно ли утверждать, что здесь мы снова имеем дело с процессом управления? На первый взгляд, положительный ответ напрашивается сам собой. Действительно, шарик, лежащий на краю стола, представляет собой физическую систему, обладающую определенным запасом потенциальной энергии. Ее даже легко подсчитать: потенциальная энергия шарика в данной конкретной системе численно равна весу шарика, умноженному на высоту стола. Подталкивая шарик, мы создаем условия для превращения потенциальной энергии в кинетическую, т. е. для совершения в системе определенного движения. Казалось бы, согласно всем сформулированным выше условиям, подталкивание шарика отвечает определению процесса управления. Но на самом деле это далеко не так. Повторяя эксперимент с шариком большое количество раз, мы убедимся, что шарик всегда будет падать на одно и то же место или, во всяком случае, в пределах достаточно небольшой области пола. Системы, в которых может совершаться только одно какое-либо действие, не относятся к кибернетическим системам, хотя бы по той простой причине, что в противном случае пришлось бы отнести к разряду кибернетических систем практически все окружающие нас предметы.

Принято считать, что система является кибернетической, если в ней может происходить большое разнообразие различных явлений

(движений). Сущность процесса управления состоит именно в том, чтобы выбрать из этого разнообразия одно какое-либо движение или последовательность движений, причем имеется в виду, что подобный выбор отвечает некоторой наперед поставленной цели. Остается правда, открытым вопрос: сколь велико должно быть подобное разнообразие, чтобы система могла быть отнесена к классу кибернетических? Ответить на этот вопрос весьма непросто, и попыткам дать такой ответ будет посвящена одна из глав книги. Заметим только, что если бы на рассмотренную нами систему с шариком мы наложили дополнительное условие, а именно, что шарик должен быть сброшен в некоторый строго определенный момент времени, то положение резко изменилось бы, поскольку здесь возникла бы проблема выбора среди большого разнообразия возможных моментов. Но пришлось бы усложнить и саму систему, добавив к ней, по меньшей мере, будильник.

Раз уж мы решили приоткрыть завесу, скрывающую секреты нашей творческой кухни, сделаем в заключение еще одно признание. Приступая к написанию научно-популярной книги, мы решили неукоснительно следовать всем установившимся для такого рода литературы канонам. Один из таких канонов, в частности, предписывает использовать как можно больше исторических фактов, причем чем древнее факт, тем с большим уважением он воспринимается. Насколько строго мы следуем принятым решениям, читатель сможет убедиться, перевернув страницу.



Твердо следуя принятым решениям, начнем с изложения истории кибернетики. До того как была вскрыта общность процессов управления и связи в животном и машине, считалось, что эти процессы проявляются только в так называемых автоматах. Подобное обстоятельство дает нам возможность вывести большими буквами заглавие

ОХОТА НА МАМОНТОВ

(ГЛАВА ПЕРВАЯ)

Автомат — слово не русское. Открываем словарь иностранных слов и читаем:

АВТОМАТ [гр. automatos — самодействующий] — устройство (машина, аппарат, прибор, приспособление), позволяющее осущест-

влять производственный процесс без непосредственного участия человека и лишь под его контролем.

Мы просмотрели много разных словарей и энциклопедий и выбрали это определение, потому что оно самое краткое. Короче написано, пожалуй, только в орфографическом словаре.

Первый автомат был изобретен в середине каменного века, т. е. примерно в 39500 г. до нашей эры. Дело происходило так. Некто, его имя не дошло до нас через толщу веков, потому что в те времена отсутствовала письменность, выделялся среди своих соплеменников как искусный охотник на мамонтов. Солнце еще не показывалось за краем горизонта, а он уже выходил на охоту, катя перед собой большой камень. Труднее всего было затащить камень на вершину скалы. Но, как мы скоро увидим, труд не пропадал даром. С одной стороны скала отвесно обрывалась вниз, а возле самого ее подножья проходила тропа, по которой мамонты обычно ходили на водопой.

Затащив камень, наш герой удобно располагался на вершине и начинал ждать (скоро сказка сказывается, да не скоро дело делается). Все же рано или поздно треск кустов доносил ему о приближении стада. Дальше события развивались стремительно. Выбрав мамонта покрупнее, охотник лишь слегка подталкивал камень. Остальное завершала сила земного притяжения.

На шум потревоженного стада и предсмертные крики жертвы сбегалось племя. Тушу убитого мамонта растаскивали по кускам, не преминув оставить охотнику самую вкусную часть. Жить бы ему да поживать, греясь в лучах своей славы, но, как говаривал Лис у Сент-Экзюпери: «Нет в мире совершенства!»

Причиной всему были комары, которые в те времена гигантских размеров никак не уступали ростом современному воробью. Согласитесь, что ждать мамонтов в такой компании — занятие не из приятных. Во всяком случае, оно наводит на размышления. И вот однажды, затащив свой камень на вершину, охотник неожиданно стал спускаться вниз. Спустившись, он выбрал в зарослях ствол молодого бамбука, срубил его каменным топором и подрезал верхушку так, чтобы конец получившегося шеста доставал как раз до вершины скалы. Охотник поставил шест точно посредине тропы, прислонил его к скале и снова полез наверх. Взобравшись, он подставил конец шеста под край камня и начал осторожно сдвигать его со скалы. В результате камень повис над обрывом, опираясь одним краем на шест, а другим — на скалу. Теперь снова оставалось только ждать.

Ожидание было вознаграждено — вожак стада, идущий впереди, толкнул лбом шест, шест выскочил из-под камня, камень обрушился на голову мамонта и огромное животное было повержено. Охотнику оставалось лишь установить свое хитроумное приспособление, после чего он спокойно отлеживался в пещере, а когда лежать становилось скучно, выбивал на каменных стенах свои «мемуары».

И снова нам придется вспомнить Лиса, потому что в природе действительно нет совершенства. Очень скоро мамонты стали осторожны. Вытолкнуть шест из-под тяжелого камня не так-то легко, и, почувствовав лбом сопротивление шеста, мамонт обходил его стороной. Попадались в ловушку только самые глупые, а их становилось все меньше и меньше.

Тогда охотник смазал верхушку шеста мылом... Своим внутренним взором авторы вдруг совершенно отчетливо увидели сар-

кастические улыбки читателей, а один даже спросил строгим голосом:

— Простите, чем? Мылом? Это в каменном-то веке!

Один из неписанных законов научно-популярной литературы гласит, что автор во что бы то ни стало должен добиться безусловного доверия читателей. Поэтому, если он и хочет протащить какое-нибудь сомнительное утверждение, он обязательно должен замаскировать его под ворохом таких непреложных истин, как «дважды два — четыре» или «машина не может стать умнее человека». Поняв, что мы нарушили этот закон и ни о каком доверии дальше уже не может быть и речи, мы совсем было решили начать все сначала. Но беда в том, что сами-то мы искренне верим, что с мамонтами все обстояло именно так, как мы написали. Разве что за исключением злополучного мыла. При этом мы с благодарностью примем все возражения читателей, но предупреждаем сразу, что всерьез будем рассматривать только возражения тех, кто своими глазами видел, как падало яблоко Ньютона, или слышал, как Архимед кричал: «Эврика!» — вылезая из ванны.

Чем же нас все-таки привлекает история с мамонтами? Во-первых, тем, что конструкция ловушки очень проста и наверняка знакома любому мальчишке, который хоть раз в жизни ловил какую-нибудь живность. Во-вторых, потому что охота на мамонтов безусловно представляла собой в те времена производственный процесс, а в данном случае он совершался «без непосредственного участия человека и лишь под его контролем». Другими словами, описанное нами устройство (машина, аппарат, прибор, приспособление) действительно есть автомат. А коли ловушку можно считать автоматом, то очевидно, что первый автомат был изобретен человеком очень и очень давно.

Наконец, в-третьих, мы не могли удержаться от соблазна сообщить нашему повествованию некий элемент сенсационности. Ведь это тоже один из стандартных приемов научно-популярной литературы. Согласитесь, автоматика в каменном веке — это захватывает воображение. Можно было, правда, сказать еще сильнее, например, что в конструкции ловушки для мамонтов использовалась атомная энергия. А без нее-то дело уже наверняка не обошлось.

Да и как нам было иначе поступить? Предположим, что в первых же строках мы бы честно заявили, что собираемся посвятить нашу книгу кибернетике. «А, — сказал бы читатель, — машина играет в шахматы, машина заменяет тысячу математиков, одним словом, быстрее мысли!» — И, может быть, даже отложил бы книжку в сторону.

Первая глава «Кибернетики» Норберта Винера начинается с небольшого детского стихотворения:

Знаешь, сколько звезд сияет
В чаше неба голубой?
Знаешь, сколько тучек тает
В небесах над всей Землей?
Только бог про это знает,
До единой он считает
Их огромное число.

Возможно, именно потому, что речь здесь идет о счете, авторы научно-популярных книг решили — писать о кибернетике, значит, писать о цифровых вычислительных (т. е. счетных) машинах. Но

Винер имел в виду совсем не это. Первая глава его книги посвящена различию между временем Ньютона и временем Бергсона. В чем же состоит это различие?

С часами в руках мы наблюдаем за движением поезда, идущего, скажем, из Москвы в Симферополь. Поезд вышел из Москвы в 14.00. В точности следуя расписанию, в 15.40 он миновал Серпухов, в 18.00 — Тулу, в 20.00 — Орел. Стоп! Представим себе теперь, что время, а вместе с ним и наши часы, пошло в обратном направлении. После 20.00 стрелки показали 18.00, затем 15.40 и т. д. Что же мы наблюдали бы тогда? В 20.00 поезд был в Орле, в 18.00 оказался в Туле, в 15 40 — в Серпухове и, наконец, в 14.00 — в Москве. Возможно ли это? Сам факт перемены направления течения времени, конечно, невозможен Во всяком случае, он еще никогда никем не наблюдался. Но все остальное (если не считать следования поезда точно по расписанию) не противоречит нашим привычным представлениям. Поезд, движущийся от Орла к Москве, столь же обычен, как и поезд, движущийся от Москвы к Орлу.

Говорят, что в ньютоновской физике время симметрично. Или иначе — если во всех уравнениях ньютоновской физики изменить знак перед буквой t, обозначающей переменную время, на противоположный, то эти уравнения останутся справедливыми и будут описывать процессы, которые могут совершаться в природе наравне с теми процессами, которые описываются уравнениями, где знак перед t положительный. Например, если некое уравнение описывает вращение шарика по часовой стрелке, то перемена знака у времени даст уравнение, описывающее вращение шарика против часовой стрелки. И то и другое, очевидно, вполне реально.

Почему же, в таком случае, мы все время подчеркиваем, что речь идет именно о ньютоновской физике? Вот почему. Представим себе, что мы написали уравнение, описывающее движение осколков чашки, выпавшей из рук неумелой хозяйки. Мы не станем писать здесь это уравнение и вообще постараемся вне крайней необходимости обходиться без уравнений. Достаточно знать, что такое уравнение может быть написано. Ясно, что произойдет, если в этом уравнении мы заменим знак перед буквой t (время) на противоположный. Переделанное уравнение будет описывать движение осколков чашки, которые движутся друг к другу и затем склеиваются все вместе, образуя целую чашку. Заметьте — без единой трещины и царапины.

С точки зрения физики Ньютона, оба уравнения справедливы и, более того, они совершенно равноправны. Но наблюдал ли кто-нибудь из вас, как осколки сами (не надо усматривать в этом слове намек на автоматику) собираются вместе и склеиваются в целую чашку? Такое бывает только в сказках. Но сказка ложь, да в ней намек, и не будем относиться к смазкам пренебрежительно.

Пока что сделаем очень важный для нас вывод. Далеко не для каждого процесса, происходящего в природе, существует обратный процесс, т. е. такой, какой получился бы, если бы время начало течь в обратном направлении. Значит, время в природе, во всяком случае в той ее части, которая доступна нашим наблюдениям, может протекать только в одном направлении. Такое несимметричное время Винер назвал бергсоновским по имени французского философа-идеалиста Андри Бергсона.

Причем же здесь детские стишки? Приводя их, Винер хотел только подчеркнуть ту мысль, что хотя и звезды и облака можно

наблюдать на небе, на этом их сходство кончается. Если можно так выразиться, звезды существуют в ньютоновском времени Изменить знак этого времени — звезды будут продолжать двигаться по своим привычным путям, хотя и в противоположном направлении. А вот с облаками все обстоит иначе. Никто еще никогда не видел, чтобы капли дождя вдруг начали подниматься вверх и, распылившись, образовали облако.

Один из наиболее общих законов природы, получивший название второго начала термодинамики, гласит: *в изолированной системе процессы протекают в сторону возрастания энтропии.* Почти каждое слово здесь требует пояснения. «Изолированной» называется система, которая не отдает накопленной в ней энергии и не получает энергии извне. Другими словами, это система, полностью отрезанная от внешнего мира. Гораздо труднее сказать, что значит «процессы протекают в сторону возрастания энтропии». Пожалуй, все дальнейшее изложение будет состоять из различных попыток ответить на этот вопрос. Пока ограничимся лишь весьма грубым толкованием. Энтропия возрастает тогда, когда относительный порядок сменяется беспорядком. В системе, где царит полнейший беспорядок, энтропия максимальна. Была чашка и разбилась — энтропия возросла. Сгорел кусок угля, стерлись подметки у ботинок — все это примеры процессов, направленных в сторону возрастания энтропии.

Второе начало термодинамики тоже имеет свою математическую формулировку или, иначе говоря, — уравнение. Достаточно заменить в этом уравнении один маленький плюс на еще более маленький минус, и мы получим мир, полный чудес. Столы в этом мире ломятся от свежайших, съеденных вчера (а также позавчера) кушаний, положенных в самосклеившиеся чашки и тарелки. Подметки у ботинок отрастают прямо на глазах, а протопив с вечера печку, мы находим ее утром полной отличных сухих дров Возможны, правда, и менее приятные явления. Например, весь воздух в вашей комнате вдруг собирается в одном из углов и, конечно, не в том, где вы находитесь. Может быть, последняя картина примирит нас с тем, что время необратимо. А коли так — мир стремится к беспорядку.

Но у беспорядка есть еще одно весьма примечательное свойство — его нельзя описать Ведь если описать беспорядок, то он тут же перестанет быть беспорядком, так как будет соответствовать определенной схеме — своему описанию. Значит, любая наука может либо описывать явления, происходящие в данный момент, либо предсказывать явления, которые произойдут в недалеком будущем. Чем длительнее срок, тем менее точными становятся такие предсказания. А о том, что произойдет в весьма отдаленном будущем, мы не в силах сказать ничего определенного.

Достаточно задать точные координаты и скорости всех частиц, из которых состоит Вселенная, — говорил Лейбниц, — и, во всяком случае принципиально, можно предсказать поведение Вселенной на сколь угодно долгий срок вперед. Современная наука опровергает это утверждение. Как бы точно мы ни знали состояние системы в данный момент времени, утверждать что-либо о ее дальнейшем поведении можно, только имея в виду относительно близкое будущее.

Мы и не собирались заниматься предсказаниями. Невозможность предсказать поведение физических систем определяется не

силой или слабостью науки. Иначе говоря, невозможность предсказания зависит не от того, кто предсказывает, будь это даже сам господь бог, подсчитавший, как мы установили выше, все звезды и все облака. Невозможность предсказания — это неотъемлемое свойство самой физической системы. Так уж устроен мир (ну, как еще раз не вспомнить Лиса!), что будущие состояния в нем лишь частично зависят от того, что происходит в данный момент.

А если события не предопределены, на них можно воздействовать, ими можно управлять. И вообще, на самом ли деле все обстоит так грустно, как это могло показаться из предыдущих строк? Вспомним, что все сказанное выше относилось только к изолированной системе Возьмем обыкновенное куриное яйцо. Достаточно продержать его некоторое время при повышенной температуре (в систему притекает энергия), как из яйца появляется цыпленок. Чисто интуитивно можно предполагать, что цыпленок — это все-таки больший порядок, чем яйцо. Правда, так происходит, только пока яйцо свежее. Стоит дать на время похозяйничать в нем второму началу термодинамики, как последующее нагревание приведет к совершенно противоположному эффекту — яйцо протухнет. Кроме того, яйцо, конечно, система неизолированная.

Теперь представим себе такой опыт. Поместим яйцо в непроницаемый ящик, где воздух нагрет до нужной температуры. Закроем ящик герметически. С этого момента все, что находится внутри ящика, представляет собой изолированную систему. В частности, поэтому температура не будет понижаться и есть все основания полагать, что через положенное время из яйца вылупится цыпленок. Изолированная система, состоявшая ранее из воздуха и яйца, превращается, таким образом, в изолированную систему, состоящую из воздуха и цыпленка. Беспорядок не только не увеличился, а скорее, уменьшился.

Не будем радоваться. Если продержать ящик закрытым еще некоторое время, второе начало термодинамики возьмет свое. И все же, хотя бы на короткий промежуток времени и в искусственно созданной системе, нам удалось создать порядок из беспорядка. Секрет здесь в том, что вместе с яйцом мы внесли в систему еще что-то. Примерно то же самое происходит, когда в насыщенный и на вид совершенно однородный раствор какой-либо соли мы опускаем маленький кристаллик той же соли — в стакане возникает подчас чрезвычайно красивый горный пейзаж.

Вывод таков. Наряду с процессами, протекающими в сторону возрастания энтропии, в природе возможны и другие, противоположные им. Вызывать эти процессы искусственно и означает управлять природой.

Если процессы первого типа условно называть *термодинамическими*, то противоположные им процессы можно назвать *процессами управления*. Второе начало термодинамики сохраняет свою силу и здесь Поэтому процессы управления могут происходить только в отдельных (локальных) частях Вселенной и только вне изолированных систем. Все же они существуют, и, что самое главное, их можно вызывать искусственно. Наука о процессах управления получила название кибернетики. Мы уже говорили, что так ее определил Норберт Винер, озаглавив свой классический труд «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине». Системы, в которых процессы управления вызываются искусственно, получили название автоматических систем или, короче, автоматов.

Что такое процесс управления? Как его можно вызывать и как заставить его служить человеку? Вот главные вопросы, на которые мы попытаемся ответить в этой книге. Что же касается цифровых вычислительных машин, то, как это ни странно, они имеют к кибернетике достаточно отдаленное отношение. Слов нет, очень часто вычислительная машина используется как часть автоматической (т. е. кибернетической) системы. Однако не относим же мы к кибернетике, например, металлургию только на том основании, что автоматы чаще всего делают из металла.

Но вернемся к мамонтам. Заметим, что мы описали выше, по крайней мере, две различные конструкции ловушки для мамонтов. Каждая из них состояла из скалы с лежащим наверху камнем. Падая вниз, камень попадал в голову мамонта и убивал его. Иначе — потенциальная энергия, которой обладал камень на вершине горы, превращалась в кинетическую, а уж эта последняя совершала свое роковое дело. В момент соприкосновения камня с головой мамонта кинетической энергии было лишь ненамного меньше, чем первоначально накопленной потенциальной. А потенциальной энергией камень снабжал человек, втаскивая его на вершину скалы.

Возникает законный вопрос: зачем же в таком случае понадобились столь хитрые приспособления, если у человека и без того хватало энергии, чтобы убить мамонта? Ответ в том, что энергия — это еще не сила. Втаскивая камень на скалу, может быть, в течение нескольких часов, человек исподволь накапливал в камне потенциальную энергию, которая освобождалась потом почти мгновенно. Следовательно, скала и камень выступали в роли аккумулятора энергии.

Роль человека иа вершине скалы или в дальнейшем бамбукового шеста состояла в том, чтобы точно определить момент времени, когда камень должен упасть. Образно говоря, кроме запаса энергии, камень должен был обладать еще знанием того, когда эту энергию использовать. В первом случае таким знанием обладал человек, а вот во втором дело обстояло несколько сложнее. В тот момент, когда лоб мамонта соприкасался с шестом, система получала сигнал — пора! Конец шеста выскакивал из-под камня, камень приходил в движение.

Схематически ловушку для мамонтов можно представить себе как состоящую из следующих основных частей:

ИСПОЛНИТЕЛЬ (сейчас говорят исполнительный механизм). Исполнителем здесь был, конечно, камень, потому что именно он выполнял то действие, ради которого было задумано все устройство.

АККУМУЛЯТОР (или в общем случае источник) ЭНЕРГИИ. Роль аккумулятора здесь играл тот же камень. Однако легко представить себе ситуацию, когда камень, падающий с вершины скалы, увлекает за собой другие, но лишь один из них попадает в мамонта. Тогда функции исполнительного механизма и источника энергии выполняли бы различные физические объекты.

ИСТОЧНИК И ПРИЕМНИК СИГНАЛА. В данном случае лоб мамонта и бамбуковый шест.

СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА ОТ ИСТОЧНИКА К ИСПОЛНИТЕЛЮ. Функции этой системы выполнял все тот же бамбуковый шест, на то он и длинный.

Поразительно, что любая современная сколь угодно сложная автоматическая система состоит из тех же самых составных частей.

Их может быть значительно больше, а сами они могут быть значительно сложнее, что, к слову сказать, далеко не всегда приводит к положительным результатам. Но основная схема остается без изменений. Где же здесь управление? Где ньютоновское и бергсоновское время и зачем авторам понадобилось рассуждать о столь высоких материях, чтобы закончить описание простейших вещей, понять которые можно, абсолютно не зная второго начала термодинамики? Вопрос законный и ответить на него не так-то просто. Заметим, однако, что, кроме двух описанных конструкций ловушки для мамонтов, можно представить себе еще и третью. Ведь камень со скалы может упасть и сам, без непосредственного участия человека и без всякого контроля с его стороны. Авторы категорически утверждают, что по крайней мере один мамонт окончил свой жизненный путь под ударом такого камня. Следовательно, третий возможный способ охоты на мамонтов — это просто подбирать животных, убитых камнями. Не станем обсуждать сейчас эффективность этого способа. Скажем только, что если бы люди каменного века пользовались этим способом как единственным источником питания, вряд ли авторы этой книжки встретились бы со своими читателями.

Камень лежит на вершине скалы. Если он находится достаточно близко к краю или даже наполовину свешивается над обрывом, рано или поздно он упадет вниз. В этом-то и проявляется второе начало — термодинамика не любит острых горных вершин и глубоких ущелий. А вот точно предсказать момент, когда это произойдет, не может никакая наука. Можно подсчитать только вероятность для камня упасть в течение заданного промежутка времени. Но одной вероятностью сыт не будешь. Камень нужно подтолкнуть или выдернуть из-под него опору. Конечно, чтобы подтолкнуть камень, надо затратить какое-то дополнительное количество энергии. В этом ли смысл? И вот теперь настала пора признаться, зачем нам понадобилось мыло. Намыленный шест гораздо легче вытолкнуть из-под камня, чем ненамыленный. Значит, если шест намылен, количество дополнительной энергии будет значительно меньше, а камень все равно упадет.

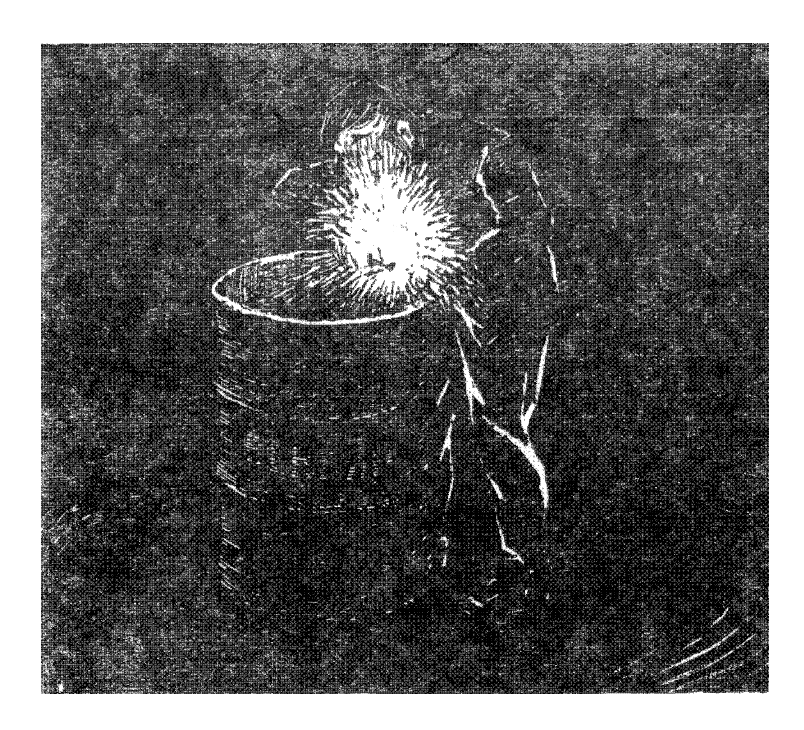
Можно ли точно предсказать, что мамонт будет убит, если заранее известно, что шест будет выдернут в нужный момент? Конечно, нет. Ведь камень может пролететь мимо или вообще не упасть, зацепившись за какой-нибудь выступ. Снова мы можем говорить только о вероятности, хотя теперь вероятность будет уже иной. Сложная система шест — камень понадобилась, следовательно, для того, чтобы изменить вероятность падения камня в данном месте и в течение данного промежутка времени. Чем выше эта вероятность, тем больше убитых мамонтов. Сущность процессов управления и состоит в том, что изменяются вероятности наступления событий. Изменение вероятности требует затраты энергии, но, как показывает пример с мылом, эти затраты могут быть очень малыми по сравнению с достигаемым эффектом.

Опишем теперь некоторые общие черты, роднящие ловушку для мамонтов с современными автоматическими системами или, проще говоря, автоматами. Всякий автомат обязательно содержит источник (аккумулятор) энергии и исполнительный механизм. Переходя от источника к исполнительному механизму, энергия заставляет последний совершать требуемые от него действия. Задача всех остальных частей системы в том, чтобы управлять этим потоком

энергии. Для управления необходимо знание. Оно поступает извне в форме различных сигналов, а если надо, то и накапливается внутри автомата. Источники сигналов, средства их передачи, накопления, а иногда и преобразования — вот остальные составные части автомата.

Остается единственный вопрос: как же все-таки управлять потоком энергии? Попытаться ответить на него мы сможем лишь несколько позже, когда опишем более подробно конструкции перечисленных выше составных частей. Пока мы можем только намекнуть, что если камень в ловушке для мамонтов падал вниз, то конец намыленного шеста двигался в горизонтальном направлении, т. е. перпендикулярно направлению движения камня. Если читатель запомнит это обстоятельство, в дальнейшем наша задача в значительной мере будет облегчена.

Теперь мы уже совсем настроились на серьезный лад и поэтому начнем следующую главу с довольно грустной истории.



«— Интересно узнать, сколько в этой бочке бензина? — сказал сэр Джон и зажег спичку.

Покойнику было двадцать четыре года».

Жутковатая, но поучительная история. Читатель должен твердо усвоить — всякое неосторожное обращение со спичками ведет к беде, а если спички да еще бензин!.. В предисловии мы несколько легкомысленно подошли к этому вопросу. Спешим исправиться и посвящаем эту главу вопросу о том,

СКОЛЬКО БЕНЗИНА В БОЧКЕ

(ГЛАВА ВТОРАЯ)

Вы уже поняли — для того чтобы ответить на этот вопрос, нельзя подходить к бочке с зажженной спичкой. Нельзя подходить к ней и с электрическим фонариком, потому что в фонарике может возникнуть искра и продолжение истории будет таким же. Можно, наконец, просто отравиться парами бензина. К бочке с бензином вообще лучше не подходить. Ну, а как же быть, если действительно надо знать, сколько бензина?

Авторы уже достаточно явно продемонстрировали свое пристрастие к мамонтам и мылу, автомобилям и лягушкам. Поэтому

посмотрим сначала, как отвечает на вопрос о количестве бензина в баке шофер автомобиля. Для этого он пользуется специальным прибором — указателем уровня бензина. Открываем книгу «Автомобиль «Москвич» модели 407»[1] и узнаем следующее.

Указатель уровня бензина устроен так, как показано на рис. 1. В баке на поверхности бензина плавает поплавок, укрепленный на рычаге. Противоположный конец рычага перемещается вдоль пластинки из изоляционного материала, на которой намотана проволока, обладающая большим удельным электрическим сопротивлением. Один конец этой проволоки соединен с корпусом автомобиля (массой), а второй — с клеммой. Сам рычаг и, главным образом, та его часть, которая касается проволоки (чуть было не забыли сказать, что эта часть металлическая и, следовательно, проводит электрический ток!), также соединен с массой. Вся только что описанная конструкция называется датчиком и укрепляется в верхней части бензобака.

Кроме датчика имеется еще указатель. Указатель состоит из двух электромагнитов, расположенных под прямым углом так, как показано на рис. 1. Электромагниты действуют на якорек, к которому прикреплена стрелка. Магнитные поля электромагнитов притягивают якорек, причем поле одного электромагнита тянет его в одну сторону, а поле второго — в противоположную.

Проследим теперь схему электрических соединений. Один конец обмотки правого электромагнита соединен с массой. Второй конец этой обмотки соединен с концом обмотки левого электромагнита, и оба они соединены с клеммой датчика. Указатель установлен на приборной доске перед глазами шофера и в противоположном конце автомобиля по отношению к месту расположения бензобака. Следовательно, соединение указателя с датчиком осуществляется с помощью длинного электрического провода. Именно потому что провод длинный, шоферу и удается последовать нашему совету и не подходить к бензобаку, когда ему нужно узнать, сколько в этом баке бензина.

Продолжим, однако, рассмотрение схемы соединений. Оставшийся свободным конец катушки левого электромагнита через ключ зажигания соединяется с положительным полюсом аккумуляторной батареи. Отрицательный полюс батареи соединен с массой.

Посмотрим, как работает описанная конструкция. Когда бак полон, поплавок находится в верхнем положении, а противоположный конец рычага находится в крайнем нижнем положении. Легко видеть, что в этом случае (и при включенном зажигании) электрический ток течет по цепи: положительный полюс аккумуляторной батареи — замок зажигания — катушка левого электромагнита — провод к датчику — свободный конец рычага — корпус автомобиля — отрицательный полюс аккумуляторной батареи. По обмотке правого электромагнита ток не течет вообще, потому что, как легко убедиться, она замкнута накоротко. По обмотке левого электромагнита течет максимально возможный ток, и поле этого электромагнита заставляет стрелку отклоняться в крайнее правое положение, где имеется отметка П, что значит «полный».

По мере уменьшения количества бензина поплавок опускается вниз, а свободная часть рычага перемещается вверх. Пусть, напри-

[1] Л. И. Белкин, Я. В. Горячий, И. В. Новоселов, Е. М. Ютт. Автомобиль «Москвич» модели 407. М., «Машиностроение», 1961.

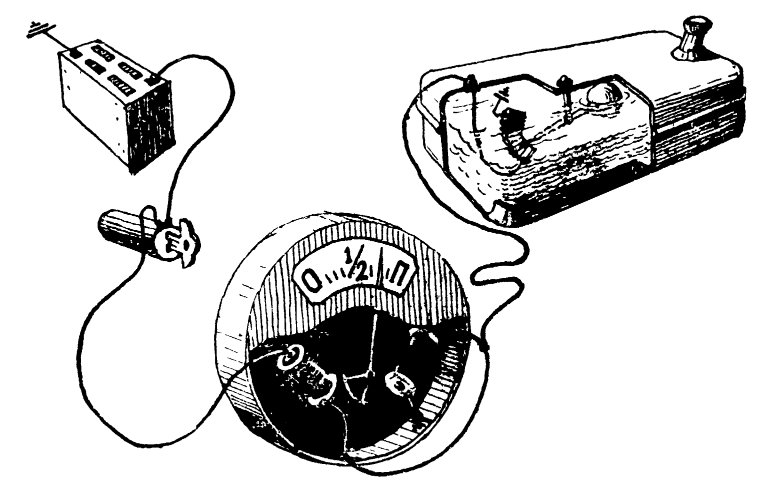


Рис. 1.

мер, бензобак опорожнен наполовину. Тогда свободная часть рычага (она называется ползунком) установится точно посередине изоляционной планки с намотанным на нее проводом (конструкция, состоящая из планки с проводом и ползунка, называется реостатом). Теперь мы имеем следующий путь протекания тока: положительный полюс аккумуляторной батареи — замок зажигания — по-прежнему обмотка левого электромагнита. Но пройдя по этой обмотке, ток разветвляется. Часть тока течет по обмотке правого электромагнита и, пройдя по ней, через корпус автомобиля возвращается к отрицательному полюсу аккумуляторной батареи; другая часть протекает по проводу реостата и затем через корпус также возвращается к отрицательному полюсу. Теперь на стрелку действуют магнитные поля обоих электромагнитов, причем, как уже отмечалось, в противоположных направлениях. Правда, поле правого электромагнита слабее, поскольку часть тока, протекающего по обмотке левого электромагнита, ответвляется в реостат. Поэтому стрелка устанавливается вертикально, против отметки 1/2 (полбака).

Рассмотрим, наконец, случай, когда бак пустой. Поплавок находится в крайнем нижнем положении, а ползунок реостата соответственно в крайнем верхнем. Электрическое сопротивление реостата при этом очень велико и доля протекающего по нему тока ничтожна. Практически весь ток от аккумуляторной батареи протекает по обмоткам правого и левого электромагнитов. Они действуют на стрелку с одинаковой силой, но в противоположных направлениях, стрелка поэтому вообще не отклоняется и стоит на отметке 0 (бак пустой).

Ниже мы подробно обсудим работу только что описанной конструкции, а пока зададим один-единственный вопрос: зачем в указателе два электромагнита? Казалось бы, вполне можно обойтись одним. Действительно, ведь сила притяжения электромагнита про-

порциональна силе протекающего по его обмотке тока, сила тока в свою очередь обратна электрическому сопротивлению цепи, а сопротивление цепи, как мы только что установили, зависит от положения поплавка. Поэтому, на первый взгляд, было бы вполне достаточно одного электромагнита, включенного последовательно с аккумуляторной батареей и реостатом, а для того чтобы создать силу, действующую в противоположном направлении по отношению к силе магнитного поля, можно было бы использовать пружину, что и делается в большинстве электроизмерительных приборов. Однако на самом деле все обстоит гораздо сложнее. Дело в том, что сила тока в цепи зависит не только от сопротивления этой цепи, но и от напряжения на ее концах (закон Ома). А напряжение аккумуляторной батареи изменяется со временем в значительных пределах, в частности, оно зависит от числа оборотов двигателя. Поэтому в конструкции с одним электромагнитом положение стрелки зависело бы не только от количества бензина в баке, но и от напряжения аккумулятора. При неисправном (севшем) аккумуляторе шофер, только что заливший бак до горловины, мог бы, например, с удивлением убедиться, что указатель показывает одну четверть.

В конструкции с двумя электромагнитами сила, действующая на стрелку, численно равна разности воздействий двух магнитных полей и, следовательно, зависит от разности токов, протекающих по обмоткам, а не от абсолютного значения силы тока, поступающего от аккумулятора. Но даже несмотря на подобные ухищрения, описание принципа действия указателя уровня бензина в цитированной выше книге сопровождается такой фразой: «Указатель служит для приблизительного контроля расхода бензина и не пригоден для определения точного расхода бензина, так как точность его показаний недостаточна».

При внимательном рассмотрении поражает обилие физических процессов, привлекаемых для решения такой, казалось бы, простой задачи, как определение уровня жидкости в резервуаре. Изменение уровня жидкости (линейное механическое перемещение) с помощью поплавка и рычага преобразуется во вращательное механическое перемещение ползунка. Вращательное механическое перемещение с помощью реостата преобразуется в изменение электрического сопротивления. Изменение электрического сопротивления в соответствии с законом Ома преобразуется в изменение силы электрического тока. С помощью электромагнита изменение силы электрического тока преобразуется в изменение напряженности магнитного поля. И, наконец, с помощью системы электромагниты — якорь изменение напряженности магнитного поля преобразуется в изменение механической силы, действующей на стрелку, т. е. в конечном итоге — в пеперемещение стрелки.

Кибернетики любят оперировать с понятием «черный ящик». Черный ящик — это нечто, имеющее вход и выход. Само понятие вводится обычно в связи со следующей задачей. Известно, как изменяется выход при заданных изменениях на входе. Требуется узнать, что у черного ящика внутри. Мы уже знаем, как устроен указатель уровня бензина, но если все же подойти к нему с позиции черного ящика, то окажется, что на входе у нас механическое перемещение и на выходе — тоже механическое перемещение. А вот внутри — длиннейшая цепь преобразований. И все это для того, чтобы избавить шофера автомобиля от печальной судьбы сэра Джона.

Конечно, какой бы ценой ни достигалась охрана безопасности и здоровья человека, эту цену мы все равно не будем считать слишком большой. Но достигается ли поставленная цель таким сложным и хитроумным способом? Так и подмывает задать вопрос: а нельзя ли привязать к поплавку, плавающему в бензиновом баке, веревку, перекинуть эту веревку через пару блоков, а второй конец привязать к стрелке указателя? Конечно, нельзя. Веревка со временем будет растягиваться, кузов автомобиля деформироваться и все это в конечном итоге приведет к потере точности. Но ведь и описанный нами указатель неточен, как об этом недвусмысленно предупреждают авторы его описания. Еще один аргумент против конструкции с веревкой — это то, что веревка может оборваться. Так мы подходим к проблеме надежности. Но не будем спешить с выводами и рассмотрим вначале еще несколько конструкций автомобильных контрольно-измерительных приборов.

Следующим на очереди у нас стоит указатель температуры воды, но для того чтобы разобраться в его конструкции, надо узнать сначала, что такое биметаллическая пластинка. Биметаллическая пластинка — это, собственно, не одна, а две пластинки, сваренные одна с другой. Одна из этих пластинок выполнена из инвара — сплава, обладающего практически нулевым температурным коэффициентом линейного расширения. Вторая пластинка выполнена из хромо-никелевой стали, у которой температурный коэффициент линейного расширения относительно велик. Если нагреть биметаллическую пластинку, то одна ее половина удлинится, а вторая — нет. Это приведет к тому, что вся пластинка изогнется в сторону своей инваровой части.

Рассмотрим теперь конструкцию указателя температуры. Указатель состоит из цилиндрической гильзы (рис. 2), внутри которой находится биметаллическая пластинка. Пластинка покрыта слоем изоляционного термостойкого материала, поверх которого намотана проволока из металла с большим удельным электрическим сопротивлением, такая же точно, как та, из которой изготовляют спирали электроплиток. Один конец этой проволоки соединен с биметаллической пластинкой, а второй — подсоединен к клемме, расположенной в торцевой части гильзы. На конце биметаллической пластинки имеется электрический контакт. Второй электрический контакт соединен с гильзой, а сама гильза — с корпусом автомобиля (массой). Все только что описанное устройство представляет собой датчик, только на этот раз не датчик уровня, а датчик температуры.

Указатель также содержит биметаллическую пластинку, покрытую слоем изоляционного материала, поверх которого намотана проволока с большим удельным электрическим сопротивлением. Один конец биметаллической пластинки жестко крепится к корпусу указателя, а второй через тягу соединен со стрелкой. Оба конца намотанной проволоки соединяются с клеммами, расположенными на корпусе указателя. Материалы и размеры обеих биметаллических пластинок подобраны таким образом, что при температурах, не превышающих 100 °C, пластинки практически не изгибаются. Пока пластинка датчика не изогнута, расположенный на ее конце контакт касается контакта, укрепленного на корпусе датчика.

Проследим теперь электрическую цепь (см. рис. 2). От положительного полюса аккумуляторной батареи через замок зажигания электрический ток поступает в обмотку биметаллической пластинки указателя. Ток проходит по этой обмотке, затем по длинному про-

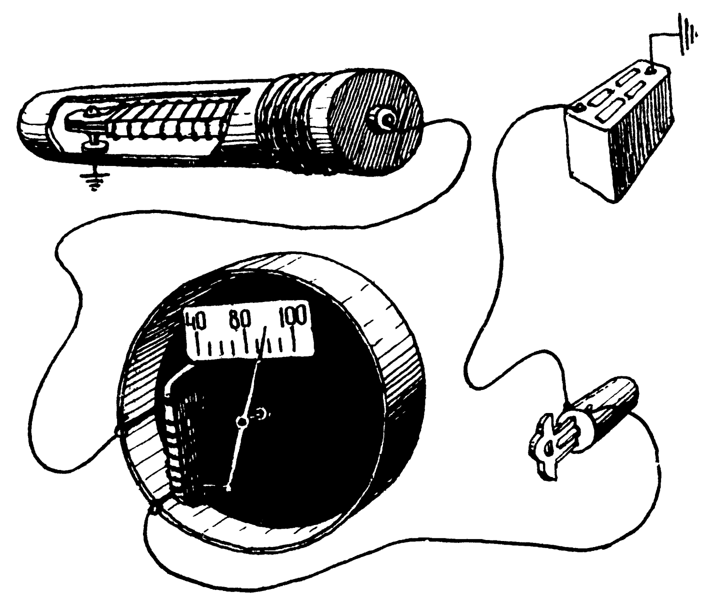


Рис. 2.

воду, идущему от приборной доски до двигателя, и, минуя клемму датчика, в обмотку биметаллической пластинки. Пройдя по этой пластинке, ток через замкнутые контакты поступает в корпус автомобиля и через него возвращается к отрицательному полюсу аккумуляторной батареи.

Под действием тока обмотка биметаллической пластинки датчика нагревается. Нагревается и сама пластинка и, нагреваясь, изгибается вверх. Контакт, расположенный на конце пластинки, отходит от контакта, укрепленного на корпусе, и цепь тока разрывается. С этого момента биметаллическая пластинка датчика начинает остывать. Остывая, она постепенно выпрямляется, контакты снова замыкаются и все начинается сначала.

Сила тока в цепи выбрана так, чтобы нагрев пластинки происходил очень быстро. За какие-нибудь доли секунды биметаллическая пластинка датчика нагревается, изгибается и контакты разрываются. При этом температура проволоки при протекании по ней тока настолько высока, что время нагрева практически не зависит от температуры датчика. А вот остывает пластинка медленно, и время ее остывания, очевидно, зависит от температуры датчика, а следовательно, и от температуры окружающей датчик среды — чем выше температура датчика, тем медленнее остывает пластина.

Таким образом, по электрической цепи указателя температуры ток протекает не непрерывно, а в виде коротких импульсов, длящихся несколько долей секунды. Количество таких импульсов в единицу времени — их частота — зависит от температуры датчика: чем выше эта температура, тем меньше частота. При нагревании дат-

чика до температуры 100 °С число импульсов тока составляет от 5 до 20 в минуту.

Если бы биметаллическая пластинка указателя представляла собой точную копию биметаллической пластинки датчика, то она также периодически нагревалась бы и остывала и стрелка указателя совершала бы колебания, но здесь применяется одна хитрость, о которой, между прочим, почему-то ничего не сказано в цитированной выше книге. А дело в том, что биметаллическая пластинка указателя значительно толще и массивнее пластинки датчика. Поэтому в перерывах между импульсами тока пластинка указателя практически не успевает остыть и ее температура оказывается равной *средней* (по времени) температуре обмотки, а эта последняя очевидно, зависит от количества электричества, протекающего по обмотке в единицу времени, т. е. от частоты следования импульсов тока.

Итак, чем меньше температура датчика, тем чаще следуют импульсы тока, тем выше температура биметаллической пластинки указателя, тем более изогнута эта пластинка и соответственно тем больше отклонение стрелки. Такой вывод кажется парадоксальным, но на самом деле здесь таится глубокий смысл. Предположим, что повышается температура воздуха, окружающего автомобиль, это повышение температуры, очевидно, подействует как на работу датчика, так и на работу указателя. Другими словами, и тот и другой будут работать с ошибками. Но при выбранной системе (чем выше температура датчика, тем ниже температура биметаллической пластинки указателя) эти ошибки будут иметь противоположные знаки и, следовательно, взаимно компенсироваться. То же самое будет происходить при изменении напряжения аккумуляторной батареи. Ясно, что уменьшение этого напряжения при прочих равных условиях должно повлечь за собой уменьшение средней температуры обеих биметаллических пластинок. Но этот эффект опять-таки действует в противоположных направлениях в датчике и указателе.

И снова мы имеем длиннейшую цепь преобразований. С помощью биметаллической пластинки температура преобразуется в механическое перемещение (деформацию пластины), механическое перемещение преобразуется в частоту следования импульсов электрического тока. Эта частота преобразуется в температуру и, наконец, температура с помощью второй биметаллической пластины преобразуется в механическое перемещение. На входе черного ящика — температура, на его выходе — перемещение стрелки.

Чтобы покончить с контрольно-измерительными приборами автомобиля, рассмотрим еще и конструкцию указателя давления масла. Датчик указателя давления масла (рис. 3) содержит биметаллическую пластину, цепь обмотки которой соединена с таким же точно указателем, как в случае датчика температуры, и с аккумуляторной батареей. Действует эта часть конструкции точно так же, как это было только что описано, и повторять описание мы, естественно, не будем. Единственное отличие состоит в том, что если в датчике температуры один из контактов был укреплен на конце биметаллической пластины, а второй жестко закреплен на корпусе датчика, то в датчике давления второй контакт укреплен на гибкой мембране, которая прогибается при увеличении давления масла, и этот контакт поднимается вверх.

Как и в предыдущем случае, при протекании по цепи тока биметаллическая пластина датчика нагревается очень быстро, за не-

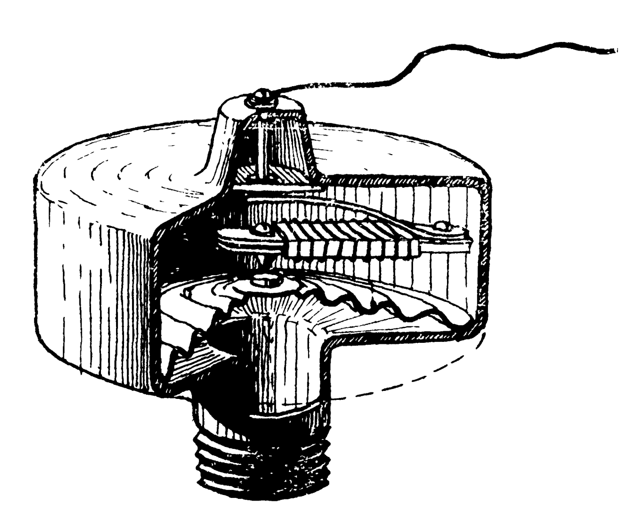


Рис. 3.

сколько долей секунды, до температуры, значительно превышающей температуру окружающей среды. Затем она начинает медленно остывать. Но вот длительность остывания, очевидно, зависит от того, насколько высоко поднят контакт, соединенный с мембраной. Чем выше этот контакт, тем меньший путь надо пройти концу биметаллической пластины до замыкания контакта, тем скорее заканчивается процесс остывания. Частота следования импульсов тока оказывается прямо пропорциональной измеряемому давлению. При величине давления 2 *кг/см*^{2} импульсы в цепи следуют с частотой порядка 70 в минуту. Читатель легко убедится самостоятельно — для указателя давления справедливо все то, что было сказано по поводу указателя температуры в части компенсации ошибок, возникающих из-за изменения температуры внешней среды и напряжения аккумуляторной батареи.

И снова черный (а для нас прозрачный) ящик, на входе которого на этот раз давление, а на выходе перемещение стрелки. Внутри ящика давление с помощью мембраны преобразуется в механическое перемещение, перемещение в результате сложных процессов нагревания и охлаждения — в частоту электрических импульсов, частота — в температуру, а затем в перемещение уже известным нам способом.

В связи с конструкцией датчика давления имеет смысл обратить внимание на одно обстоятельство. Если рассмотреть только часть описанной последовательности преобразований, начиная от мембраны и кончая стрелкой указателя, то мы получим черный ящик, на входе которого действует механическое перемещение, а на выходе получается также механическое перемещение. Если вместо мембраны на конце рычага с поплавком укрепить подвижной контакт, то такая система окажется пригодной и для измерения уровня бензина в баке. При этом она сохранит все свои преимущества

в части компенсации ошибок. И в то же время по сравнению с описанным выше указателем уровня бензина эта новая конструкция будет обладать еще одним весьма существенным преимуществом.

Представим себе автомобиль, едущий по проселку или по булыжнику. Поплавок в баке такого автомобиля непрерывно подпрыгивает. Если указатель выполнен так, как это было описано выше, то прыгает и стрелка. Всякий, кто ездил на автомобиле по неровным дорогам, знает, что определить уровень бензина на ходу не так-то просто.

Стрелка на приборной доске судорожно мечется от отметки 0 до отметки П.

Все будет выглядеть совсем иначе, если использовать конструкцию указателя уровня бензина с биметаллическими пластинами. Вспомним, что здесь положение стрелки определяется *средней* температурой биметаллической пластины указателя. Последняя в свою очередь зависит от *среднего* количества электрических импульсов в единицу времени. При езде по неровной дороге при одном и том же количестве бензина в одну какую-то секунду может последовать больше импульсов (поплавок от толчка подскочил вверх), а в следующую за ней секунду — соответственно меньше (поплавок опустился ниже уровня). Но среднее количество импульсов за период, равный тепловой постоянной времени[1] биметаллической пластины, будет оставаться постоянным. Следовательно, как бы ни трясся автомобиль, стрелка указателя будет оставаться на месте и правильно показывать уровень бензина.

Конструкции указателей с биметаллическими пластинами оказываются еще сложнее, чем мы предполагали. Кроме преобразований одних физических величин в другие (перемещения или температуры в частоту импульсов и т. д.), в этих конструкциях выполняется еще и *математическая операция* усреднения. Выполняет эту операцию та же биметаллическая пластина благодаря присущей ей тепловой инерции.

Настала пора обобщить полученные сведения. Современная индустрия использует бесчисленное количество видов всевозможных измерительных приборов и систем. Чтобы описать хотя бы важнейшие из них, понадобилась бы толстая книга. Мы сознательно выбрали здесь контрольно-измерительные приборы автомобиля. Во-первых, автомобили настолько прочно вошли в наш быт, что вряд ли сейчас найдется человек, который не видел бы приборной доски шофера. Наверное, однако, далеко не все, даже постоянно имея дело с этими приборами, заинтересовались их принципом действия. Во-вторых, автомобиль существует уже без малого сотню лет и современная его конструкция впитала в себя огромный опыт многих поколений инженеров и изобретателей. Наконец, как это ни странно на первый взгляд, описанные конструкции приборов достаточно просты. Если бы современный инженер задался целью сконструировать ловушку для мамонтов, то дело наверняка не обошлось бы без радиоактивных изотопов, счетчиков Гейгера, лазеров и тому подобной технической экзотики. По всем этим соображениям описанные выше приборы мы вправе считать достойными представителями современного контрольно-измерительного вооружения.

---

[1] Тепловой постоянной времени называется время, в течение которого температура изменяется в *e* раз, т. е. примерно в 2,7 раза.

Какие же общие черты можно заметить у трех приборов, рассмотренных выше? Каждая из них состоит из четырех основных частей: датчика, линии связи, приемника и источника питания. Рассмотрим их поподробнее.

Датчик выполняет две основные функции. Он измеряет некоторую физическую величину (в нашем случае перемещение, температуру или давление) и преобразует ее в другую физическую величину. Измерение — это всегда сравнение физической величины с некоторой другой физической величиной той же природы — эталоном. С этой точки зрения мы можем выделить два различных случая В датчике уровня бензина величина механического перемещения (длина) сначала сравнивается с длиной пластины из изоляционного материала, а затем результат такого сравнения преобразуется в пропорциональную перемещению величину электрического сопротивления. Другими словами, здесь сначала выполняется измерение, а затем преобразование. В датчике температуры величина температуры сначала с помощью биметаллической пластины преобразуется в механическое перемещение, это перемещение затем в результате сложного электротермического процесса преобразуется в интервал времени остывания. А вот время остывания уже сравнивается с эталонной величиной интервала времени, причем роль эталона в данном случае играет время нагревания пластины электрическим током. Следовательно, здесь операция преобразования предшествует операции измерения. То же самое имеет место и в случае датчика давления. Заметим, что выходной величиной датчиков давления и температуры является в нашем случае отношение двух интервалов времени.

Линия связи служит для передачи значений физической величины, полученных на выходе датчика, на некоторое расстояние. В современных контрольно-измерительных приборах эти расстояния могут изменяться от нескольких сантиметров до нескольких тысяч километров. Используются весьма различные так называемые носители сигналов, а следовательно, и различные физические конструкции линий связи. В рассмотренных нами приборах в качестве носителя сигналов выступал электрический ток и соответственно линия связи представляла собой электрический провод. Правда, в указателях температуры и давления роль электрического тока была весьма своеобразной. Здесь использовалась не столько сила тока — мы уже отмечали с удовлетворением, что абсолютная величина этой силы мало влияет на показания приборов, — но главным образом моменты времени, когда этот ток включался и выключался.

В современной контрольно-измерительной технике используются самые различные средства связи. Это могут быть и трубопроводы, заполненные жидкостью, по которым передается давление, и радиолинии, и оптические (особенно лазерные) линии, и многое другое. Но сама линия связи является неотъемлемой частью как простейших, так и самых сложных приборов.

Приемник, так же как и датчик, выполняет функции преобразователя и (правда, не всегда) функции, если можно так выразиться, вторичного измерителя. В рассмотренных нами случаях все приемники преобразовывали поступающую на их вход величину в величину перемещения стрелки. Приборы такого типа так и называются стрелочными, используются они для непосредственного наблюдения. Перемещение стрелки здесь сравнивается с эталоном — шкалой. Это и есть вторичное измерение. Кроме стрелочных, совре-

менная контрольно-измерительная техника располагает широчайшим ассортиментом всевозможных приемников. В их числе можно назвать самописцы, регистрирующие результаты измерения в виде кривой на бумажной ленте, печатающие приборы, которые не только печатают результаты измерения в виде цифр, но подчас сопровождают эти данные своими собственными комментариями, а также приемники, преобразующие входной сигнал в физическую величину иной природы, удобную для дальнейшего использования. Эти последние представляют для нас наибольший интерес. Как уже отмечалось, в некоторых приемниках преобразование не ограничивается получением физической величины, значения которой пропорциональны значениям величины на входе. В приемниках могут выполняться весьма сложные математические операции. К этому вопросу мы тоже еще вернемся в дальнейшем.

Источник питания обеспечивает работоспособность всех остальных элементов системы. В нашем случае в качестве источника питания каждый раз выступала электрическая батарея. Наличие источника питания чрезвычайно характерно для современных методов измерения. Легко сделать вывод, что процесс измерения всегда сопровождается затратами энергии. Энергия нужна хотя бы для того, чтобы просто отклонить стрелку прибора. Однако, как это было продемонстрировано, эксплуатация современных контрольно-измерительных приборов требует значительно больших затрат. Например, для того чтобы нагреть биметаллическую пластинку указателя давления или температуры, требуется мощность в несколько ватт, а следовательно, несколько ватт-часов на каждые сто километров пути. Откуда брать эту энергию? Когда мы измеряем, например, температуру воздуха с помощью обычного ртутного термометра, то энергия, требующаяся для расширения ртути, поступает из атмосферы, т. е. от самого объекта измерения. Но отбирая энергию у объекта измерения, мы тем самым изменяем его режим, т. е. искажаем результаты измерения. В случае атмосферы это, конечно, не страшно — атмосферу градусником не охладишь. Но при объектах меньших размеров подобное влияние измерительного прибора может оказаться весьма существенным. Отсюда и потребность в источнике энергии.

Вернемся теперь к ловушке для мамонтов. Располагая уже солидным запасом знаний в области контрольно-измерительной техники, мы сразу обнаружим и здесь знакомые черты. Действительно, ведь бамбуковый шест — не что иное, как контрольно-измерительный прибор, предназначенный для измерения местоположения мамонта. Та его часть, которая непосредственно касается лба мамонта, представляет собой датчик. Этот датчик сравнивает положение мамонта с эталоном (точка, где шест упирается в землю) и преобразует линейное перемещение мамонта в упругую деформацию шеста. Часть шеста, простирающаяся от лба мамонта до камня, представляет собой линию связи. Наконец, самый кончик шеста — это приемник. Изменяя свое местоположение, он создает условия для возникновения дальнейшей цепи событий. А вот чего здесь нет, так это источника энергии! Роль источника вынужден был взять на себя мамонт, именно поэтому умные мамонты стали обходить ловушку и тем самым создали предпосылку для технического прогресса. Как мы уже отмечали, прогресс начался с использования мыла. Ну, а раз мы уже поговорили и об автомобилях, и о мамонтах, и о мыле, пора переходить к лягушкам.

Контрольно-измерительная система лягушки — это ее нервная система. Нервная система состоит из отдельных нервов или, точнее, нервных клеток, называемых нейронами. Конструкция нейрона показана на рис. 4. Нейрон состоит из тела клетки, имеющего множество отростков — дендритов. Кроме коротких разветвленных отростков — дендритов, тело клетки имеет один длинный отросток — аксон. Длина аксона изменяется в зависимости от назначения нейрона и может достигать метра и более. Аксон заканчивается ответвлениями, подобными дендритам тела клетки. Нормально эти ответвления контактируют с дендритами других нейронов. Точки таких контактов называются синапсами.

Поскольку наша книжка не посвящена биологии, принцип действия нейрона мы будем рассматривать значительно менее подробно, чем принцип действия указателя бензина. Это объяснение чрезвычайно своевременно пришло нам в голову, так как в противном случае пришлось бы признаться, что принцип действия нейрона в точности еще не известен современной науке. Но кое-что все же можно сказать.

Каждый нейрон, взятый в отдельности, представляет собой типичный контрольно-измерительный прибор. Роль датчиков здесь играют окончания дендритов Нормально дендриты реагируют на изменение электрического потенциала, хотя в отдельных случаях могут реагировать и на другие раздражеиия.

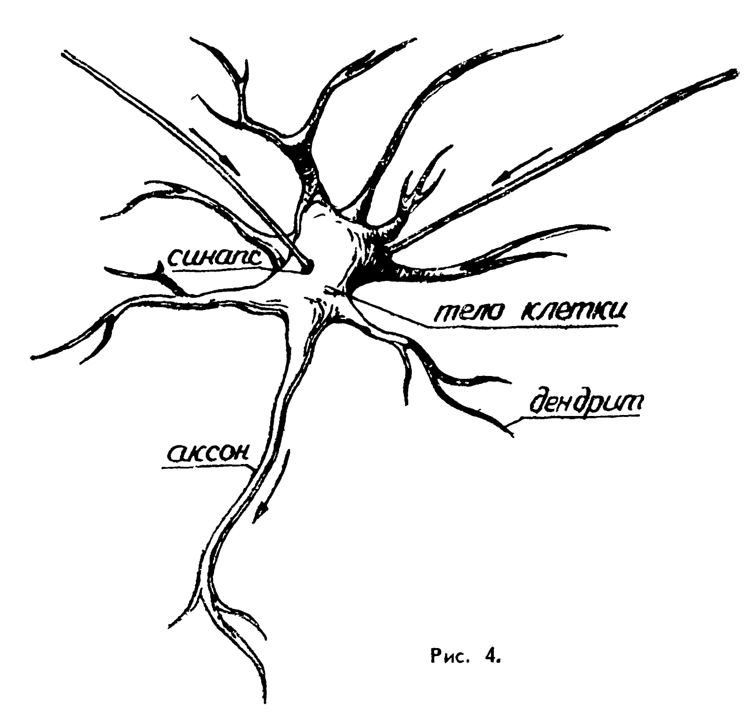


Рис. 4.

Результаты измерения (то, что здесь речь идет именно об измерениях, будет показано ниже) передаются по дендриту к телу клетки, которая играет роль приемника. Тело клетки возбуждается и посылает электрический импульс по аксону.

Посылка импульса по аксону —показатель того, что суммарный сигнал, принятый телом клетки, превысил определенный критический уровень, который мы и называем порогом. Заметим, что здесь мы снова сталкиваемся с измерением, т. е. сравнением с эталоном — порогом.

После посылки импульса величина порога резко возрастает. Это означает, что для генерации следующего импульса тело клетки должно принять от своей дендритной структуры неизмеримо больший суммарный сигнал. Клетка как бы временно истощается. Но постепенно величина порога падает до первоначального уровня и внешние сигналы, если они продолжают поступать, снова могут достаточно легко вызывать возбуждение клетки, сопровождающееся посылкой очередного сигнала.

Количество возбуждений тела клетки в секунду служит, таким образом, мерой величины итогового сигнала (т. е. числа сигналов), принятого дендритной структурой. Чем больше итоговый приходящий сигнал, тем большее число сигналов в секунду будет посылать клетка. Трудно удержаться здесь, чтобы не отметить поразительную аналогию с указателями температуры и давления.

Разберем теперь подробнее конструкцию аксона, поскольку он представляет собой самую простую часть нейрона и, кроме того, есть основания полагать, что многое из сказанного об аксоне окажется справедливым и для дендритов. В разрезе аксон напоминает цилиндр, поверхность которого (оболочка) именуется мембраной (рис. 5). Внутри оболочка заполнена веществом, содержащим электрические заряженные частицы — ионы. Окружающая среда также

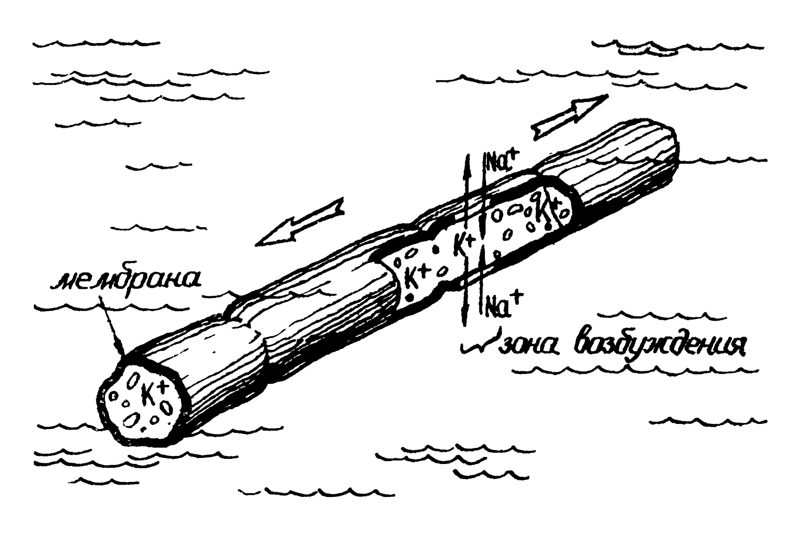


Рис. 5.

содержит ионы, однако внутри преобладают ионы калия (K^+), а снаружи — ионы натрия (Na^+). Известно, что в точке контакта двух различных металлов возникает так называемая контактная разность потенциалов. Именно это обстоятельство, т. е. контактную разность потенциалов железа и меди, использовал в своих опытах Луиджи Гальвани. Калий и натрий — это металлы, и им присуще описанное свойство, поэтому нормально между содержимым оболочки аксона и окружающей средой поддерживается постоянная разность потенциалов величиной 70 *мв*, причем потенциал внутреннего наполнения аксона отрицателен по отношению к внешней среде. Отметим еще, что в нормальном состоянии мембрана аксона не пропускает через себя ионы калия и натрия.

Если теперь с помощью какого-либо внешнего воздействия в определенной области аксона (мы будем называть эту область областью возбуждения) уменьшить разность потенциалов между внутренним содержанием аксона и внешней средой ниже определенного значения, называемого порогом, то свойства мембраны резко меняются. Мембрана начинает пропускать через себя ионы. Сначала внутрь аксона устремляются ионы натрия. Это сопровождается быстрым изменением напряжения, и процесс длится до тех пор, пока содержимое аксона в области возбуждения не достигнет потенциала, положительнсго относительно среды, величиной около 40 *мв*. Затем через мембрану начинают выходить наружу ионы калия, что также сопровождается изменением разности потенциалов, но уже в обратном направлении.

Только что описанный процесс будет продолжаться и в том случае, если вызвавшая его причина уже перестала действовать. Сам процесс называется разрядом, и, таким образом, область возбуждения после прекращения самого возбуждения превращается в область разряда.

Содержимое аксона в области разряда, как уже отмечалось, имеет положительный потенциал. То же содержимое в прилегающих к области возбуждения участках по-прежнему имеет отрицательный потенциал. Этот заставляет некоторые ионы двигаться параллельно мембране как внутри аксона, так и в окружающей среде. Перемещение ионов в свою очередь приводит к изменению разности потенциалов и к изменению свойств мембраны. Области разряда начинают перемещаться вдоль аксона в обе стороны от области возбуждения. В самой же области возбуждения начинается обратный процесс: натрий постепенно возвращается во внешнюю среду, а калий — внутрь аксона. Этот процесс называется процессом восстановления, а область возбуждения, которая затем была нами переименована в область разряда, становится теперь областью восстановления. Но потенциал внутри области восстановления к концу этого процесса становится отрицательным, и некоторые ионы начинают двигаться в обратную сторону вдоль аксона, а это опять-таки порождает процессы восстановления в смежных участках. Таким образом, вслед за движущимися вдоль аксона областями разряда отправляются в свое путешествие и области восстановления.

Поскольку возбуждение аксона в любой его точке порождает два импульса электрического напряжения, распространяющиеся вдоль аксона в обе стороны от области возбуждения, любая часть аксона может играть роль датчика, выполняющего функции измерителя (вспомним, что разряд возникает только в том случае, если

внешний электрический сигнал превышает определенную величину порога — эталона) и преобразования исходной электрической величины в сложный электрохимический процесс. Все остальные части аксона играют при этом роль линии связи. По аксону, так же как и по электрическому проводу, распространяются электрические импульсы, однако аналогия здесь чисто внешняя.

Электрический ток в проводнике — это движение электронов. Если на концах проводника создается разность потенциалов, то под воздействием электрического поля электроны, расположенные в непосредственной близости от концов, слегка перемещаются. Это перемещение влечет за собой перемещение близлежащих электронов и т. д. Интересно заметить здесь, что сами электроны перемещаются относительно медленно, а весьма высокая скорость распространения электрического сигнала по проводнику — эта скорость близка к скорости света — определяется скоростью передачи воздействия от одного электрона к другому. Но при прохождении электрического тока свойства самого проводника не меняются. В то же время движение электронов в проводнике сопровождается выделением тепла и потерей энергии. Поэтому, по мере распространения по проводнику, энергия сигнала постепенно уменьшается и, если проводник достаточно длинен, сигнал может полностью исчезнуть, так и не дойдя до его конца. Аналогичные явления происходят и в том случае, если в качестве линии связи используется, скажем, трубопровод с жидкостью. Еще быстрее затухает энергия сигнала, передаваемого по радиоканалу.

Ничего подобного не наблюдается в случае аксона. Здесь передача сигнала обусловливается изменением свойств мембраны. Образование в одном месте области разряда приводит к соответствующим изменениям свойств мембраны и образованию процессов разряда в смежных областях. При этом каждая область разряда представляет собой как бы самостоятельный источник сигнала. Энергия этого сигнала не заимствуется у смежной области, а поступает из внешней среды (ионы калия). Поэтому, как бы ни был длинен аксон, проходящий по нему сигнал не затухает.

Последнее наблюдение имеет огромное значение. Оказывается, нервная система лягушки, а заодно и человека, имеет вполне «современную» конструкцию. Кроме датчиков, линии связи и приемника, она содержит также и источник питания. Это одна из причин весьма высокой надежности функционирования нервной системы.

В известном смысле конструкция нервной системы лягушки даже совершеннее конструкции системы электрооборудования автомобиля. Последняя имеет единственный источник питания — аккумуляторную батарею. Все остальные элементы системы подсоединяются к источнику с помощью проводов. Эти провода подчас очень длинны, а количество их крайне велико. Обрыв любого провода приводит к прекращению функционирования соответствующей части системы.

Источник питания нервной системы лягушки не сосредоточен в одном месте, как аккумуляторная батарея, а распределен повсюду. Нервная система как бы плавает в собственной энергетической ванне. Поэтому здесь невозможны отказы отдельных частей из-за прекращения питания. Может иссякнуть только общий запас энергии, например в связи со смертью организма. Но такой процесс исчерпания энергии происходит постепенно. Именно поэтому лапки

лягушки продолжают действовать еще в течение сравнительно долгого времени после того, как их отделили от всего остального.

Наличие сосредоточенного источника питания имеет еще один существенный недостаток. Конструкторам электронных вычислительных машин и других сложных автоматических устройств хорошо известно, что по проводам электропитания распространяются паразитные сигналы (так называемые наводки), сплошь и рядом вызывающие неправильные срабатывания элементов. Ничего подобного не может быть, если каждый элемент имеет свой собственный источник питания, т. е. черпает энергию непосредственно из окружающей среды.

Подводя итоги, мы можем окончательно утверждать теперь, что в своих главных проявлениях нервная система живого организма построена по тому же принципу, что и искусственные контрольно-измерительные системы. Она содержит датчики, причем весьма разнообразные. Кроме рассмотренного нами электрического датчика, нервная система располагает оптическими датчиками (палочки и колбочки в сетчатке глаза), датчиками механических перемещений, обеспечивающими чувство осязания животных и человека, датчиками температуры, а также не воспроизведенными пока в технике датчиками запахов и химическими (вкусовыми) датчиками. Что касается слуха, то здесь используются датчики перемещений, воспринимающие давление воздуха в сложной акустической системе уха.

Нервная система живых организмов обладает весьма совершенными линиями связи, приемниками, способными выполнять математические преобразования, и, наконец, совершенной системой питания.

Естественным следствием подобной аналогии является то, что законы функционирования искусственных контрольно-измерительных систем и нервных систем живых организмов также оказываются аналогичными. Конечно, эта аналогия выдерживается только в общем. В отдельных деталях не может не быть различий. Например, скорость распространения сигнала по аксону в тысячи раз меньше скорости распространения электрического сигнала по проводнику. Имеются поразительные совпадения и в деталях, например отмеченная выше аналогия между работой тела клетки — нейрона и биметаллической пластины датчика температуры. К слову сказать, при более подробном рассмотрении, которое мы, к сожалению, не можем провести в рамках нашей книги, эта аналогия оказывается еще более глубокой.

В данной главе мы достаточно поверхностно коснулись вопроса о том, что нужно для того, чтобы знать. Настала пора сделать следующий шаг и подумать, как использовать полученные знания.



«... Болото с ужасной быстротой засасывало нас глубже и глубже. Вот уже все туловище моего коня скрылось в зловонной грязи, вот уже и моя голова стала погружаться в болото и оттуда торчит лишь косичка моего парика.

Что было делать? Мы непременно погибли бы, если бы не удивительная сила моих рук. Я страшный силач. Схватив себя за эту косичку, я изо всех сил дернул вверх и без большого труда вытащил из болота и себя и своего коня, которого крепко сжал обеими ногами, как щипцами».

«Самый правдивый человек на земле» на этот раз чуть было действительно не сказал правду, потому что мы собираемся раскрыть здесь секрет:

КАК ПОДНЯТЬ САМОГО СЕБЯ ЗА ВОЛОСЫ

(ГЛАВА ТРЕТЬЯ)

А сделать это очень просто — нужно только иметь достаточно длинные волосы и блок, прикрепленный над головой к какой-нибудь прочной опоре. Перекинув волосы через блок и потянув за свободные концы вниз, вы легко достигнете желаемого. Несколько

сложнее обстоит дело с конем. Но и конь не преграда, если вместо блока использовать кабестан. Однако, пожалуй, начнем по порядку.

Посмотрим внимательно на устройство, показанное на рис. 6.

На этом рисунке изображен вал, вращающийся с постоянной скоростью в направлении, указанном стрелкой. Скорость вращения вала в данном случае нас не интересует, и в то же время мы предполагаем, что механизм, приводящий вал во вращение обладает неограниченно большой мощностью. Через вал перекинута веревка, один конец которой висит свободно, а второй прицеплен к динамометру (прибору для измерения силы). Сам динамометр прикреплен к какой-нибудь неподвижной опоре, например к стене. Нормально поверхность вала легко скользит относительно веревки и стрелка динамометра стоит на нуле. Если мы теперь надавим на веревку сверху с некоторой силой P, то благодаря наличию трения веревка натянется. Натяжение веревки в свою очередь вызовет равную ему по величине и противоположно направленную реакцию опоры. Силу этой реакции мы обозначаем через F.

Из элементарного курса физики известно, что сила F должна быть численно равна величине силы P, умноженной на коэффициент трения. Следовательно, если мы хотим воспользоваться конструкцией, изображенной на рис. 6, для того чтобы потянуть за крюк, вделанный в стену, с силой, равной F, мы должны нажать на веревку с силой P, причем $P = F/\alpha$, где α — коэффициент трения. Из элементарного курса физики известно также, что коэффициент трения всегда меньше единицы. Следовательно, сила P, с которой мы давим на веревку, заведомо больше силы F. Казалось бы, рассмотренная конструкция не имеет никакого смысла. Действительно если наша цель состоит в том, чтобы потянуть за крюк с силой F, то гораздо проще сделать это непосредственно, а не связываться с какими-то там вращающимися валами в конечном итоге затрачивать усилие даже большее того, которое необходимо.

Не будем торопиться с выводами. Сделаем пока одно чрезвычайно важное наблюдение — сила P направлена перпендикулярно си-

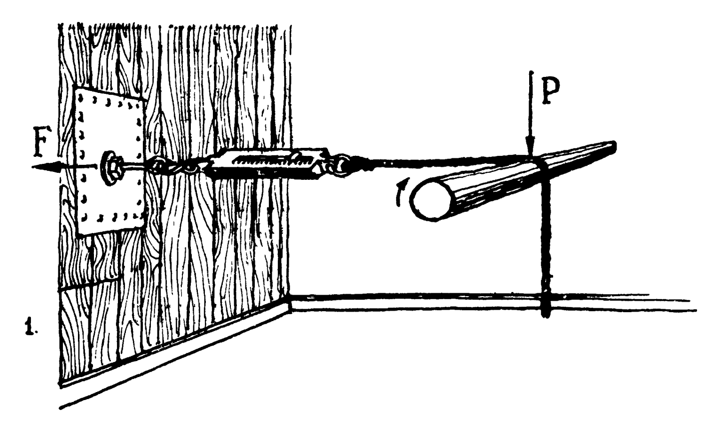


Рис. 6

ле F. А теперь, вместо того чтобы давить на веревку, захватим ее свободный конец, повернем его на четверть оборота и потянем за него с силой P так, как показано на рис. 7. Теперь веревка давит на поверхность вала с силой $P+F$ и величина силы F равна:

$$F = \alpha(P + F),$$

что после элементарных преобразований дает:

$$F = \frac{\alpha}{1 - \alpha} P.$$

Теперь, если коэффициент трения α больше чем 0,5, сила F оказывается больше силы P. Следовательно, если тянуть за конец веревки и если коэффициент трения превышает 0,5, то наша конструкция уже имеет смысл, так как здесь получается выигрыш в силе.

Рассмотрим конструкцию, показанную на рис. 8. Это не что иное, как два уже знакомых нам механизма, соединенных последовательно. Прикладывая к свободному концу веревки силу P, мы с помощью первого вала получаем силу F', величина которой была вычислена выше. Но сила F' опять-таки приложена к веревке, огибающей вал. В результате сила, действующая на крюк, укрепленный в стене, оказывается равной

$$F = \frac{\alpha}{1 - \alpha} F'$$

или, подставляя на место величины F' ее значение,

$$F = \frac{\alpha^2}{(1 - \alpha)^2} P.$$

Осталось только заметить, что нет никакой необходимости использовать второй вращающийся вал. Его роль с успехом может сыграть оставшаяся свободной половина окружности первого вала.

В результате мы приходим к конструкции, показанной на рис. 9. Она обладает в точности теми же свойствами, что и конструкция на рис. 8, и позволяет нам сделать вывод, что если в нашем распоряжении имеется вращающийся вал и если мы обернем вокруг этого вала веревку так, чтобы она сделала один оборот, и потянем за свободный конец с некоторой силой P, то противоположный конец веревки будет действовать на то,

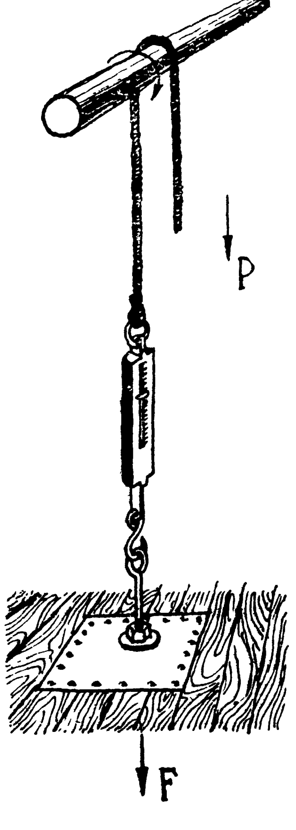


Рис. 7.

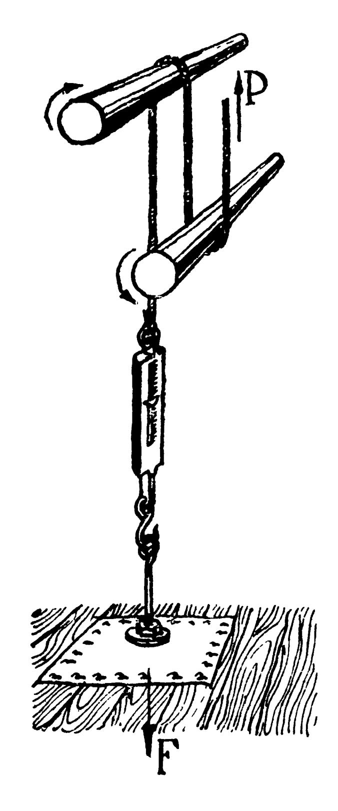


Рис. 8.

к чему он привязан, с силой F, которая в $\alpha^2/(1-\alpha)^2$ раз больше силы P. Если коэффициент трения α больше 0,5, то и сила F больше силы P. Например если $\alpha=0{,}9$, то сила F будет в 81 раз больше силы P. Теперь ясно, что если бы над головой погрузившегося в болото барона Мюнхаузена случайно оказался вращающийся вал, то, обернув косичку своего парика вокруг этого вала и потянув за свободный конец, он вполне мог бы вытащить себя вместе с лошадью. Вызывает, правда, сомнение целость шейных позвонков нашего героя, но это уже, как говорится, не входит в условия задачи.

Но ведь веревку вокруг вала можно обернуть и так, чтобы она совершила несколько оборотов. Повторяя те же рассуждения, мы придем к выводу, что полученная таким образом конструкция эквивалентна нескольким последовательно соединенным механизмам, в каждом из которых веревка совершает вокруг вала один оборот. Другими словами, при n оборотах вокруг вала сила, действующая на одном конце веревки, будет превышать силу, действующую на другом конце веревки, в $\alpha^{2n}/(1-\alpha)^{2n}$ раз.

Такой механизм называется кабестаном и широко используется в технике, особенно на кораблях. Заметим, что вращающийся вал нужен только в том случае, когда оба конца веревки перемещаются, например при перетаскивании с места на место какого-нибудь груза. Если же, как это было во всех наших примерах, задача состоит в том, чтобы получить силу большой величины, приложенную к неподвижной опоре, вал также может оставаться неподвижным. Всякий, кто хоть раз в жизни совершал поездку на корабле, наверняка обратил внимание, как при швартовке матрос удерживает корабль, обернув швартов (веревку) несколько раз вокруг неподвижного столбика — кнехта.

Кабестан — это один из примеров целого множества технических устройств, называемых *усилителями*. Об усилителях нам хочется сказать очень многое и, в частности, показать, что само название выбрано, на наш взгляд, исключительно неудачно. Но перед тем как переходить к общим выводам, рассмотрим еще одну конструкцию кабестана, на этот раз электронного. Для этого нам понадобится транзистор — полупроводниковый прибор с тремя выводами.

На электрических схемах транзисторы изображаются в виде условных обозначений, так, как показано на рис. 10. Здесь база обозначена буквой *б*, коллектор — буквой *к* и эмиттер — буквой *э*.

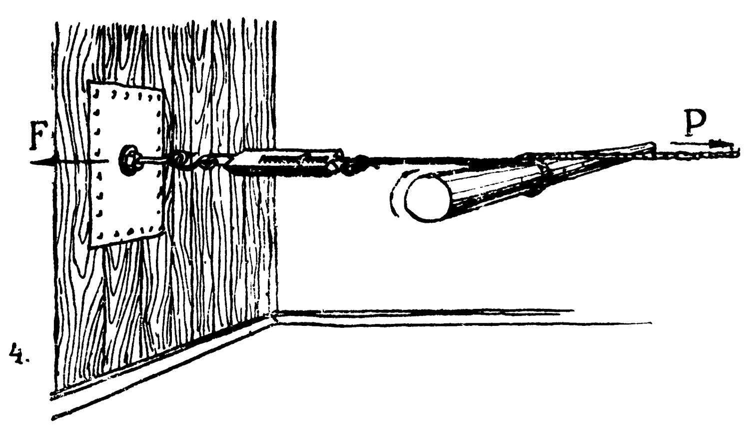


Рис. 9.

Если между эмиттером и базой кремниевого транзистора включить электрическую батарею так, чтобы ее положительный полюс был соединен с базой, а отрицательный — с эмиттером, то по цепи эмиттера потечет ток. Этот ток называется током эмиттера и обозначается $i_э$. Если между коллектором и базой включить другую батарею, на этот раз так, чтобы ее отрицательный полюс был соединен с базой, а положительный — с коллектором, то по цепи коллектора также потечет ток, называемый током коллектора и обозначаемый $i_к$. Известно, что ток коллектора зависит от тока эмиттера. Точнее, он всегда немного меньше тока эмиттера. Следовательно, мы вправе написать:

$$i_к = \alpha i_э.$$

Обнаруживается поразительное сходство с конструкцией механизма, изображенного на рис. 6. Мы снова имеем две силы (тока), причем одна из них прямо пропорциональна другой, а коэффициент пропорциональности α, который в данном случае называется коэффициентом усиления по току (для большей убедительности мы использовали для его обозначения ту же самую букву), как и коэффициент трения, ни при каких условиях не может превышать единицу.

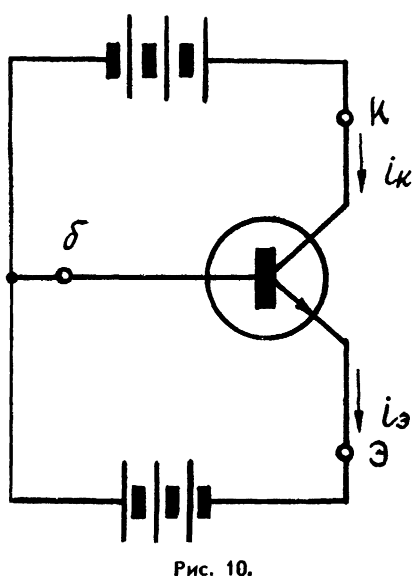


Рис. 10.

Теперь нам остается только довести до конца идею кабестана. Для этого составим схему, показанную на рис. 11. Здесь используются тот же транзистор и те же две батареи. Одна из них включена между базой и эмиттером и вызывает появление тока эмиттера. А вот другая в отличие от схемы, показанной на рис 10, включена так, что ее положительный полюс соединен с коллектором, а отрицательный — с эмиттером. Это вынуждает коллекторный ток протекать сначала по цепи коллектор — база, а затем по цепи база — эмиттер. Следовательно, по цепи эмиттера протекает уже сумма токов или, иными словами,

$$i_к = \alpha\,(i_э + i_к),$$

что после элементарных преобразований дает:

$$i_к = \frac{\alpha}{1-\alpha}\, i_э.$$

Спешим обратить внимание читателя на то, что эта формула полностью совпадает с соответствующей формулой, описывающей работу механизма, показанного на рис. 7. Совпадают не только формулы, в точности совпадают все промежуточные выкладки, в результате которых они были получены. Более того, чтобы перейти от механизма, показанного на рис. 6, к механизму, показанному на рис. 7, мы просто повернули веревку еще на четверть оборота. А чтобы перейти от схемы на рис. 10 к схеме на рис. 11, мы изменили только место подключения одного проводника.

К сожалению, аналогия на этом и кончается. Мы можем включить два транзистора последовательно, т е. продолжить путь, приведший нас к получению устройства, аналогичного показанному на рис. 8, но не можем, к сожалению, совершить «полный оборот» вокруг одного транзистора, как это было сделано при конструировании механизма, показанного на рис. 9.

И все же существующая аналогия настолько глубока, что мы можем не затруднять читателя сведениями из области физики твердого тела, а также из других областей, как, например, теории ферромагнитных материалов, гидродинамики и т. п, что понадобилось бы для рассмотрения принципа действия усилителей других типов. Все необходимые нам для дальнейшего сведения относительно усилителей мы можем получить из одного-единственного примера, а именно кабестана.

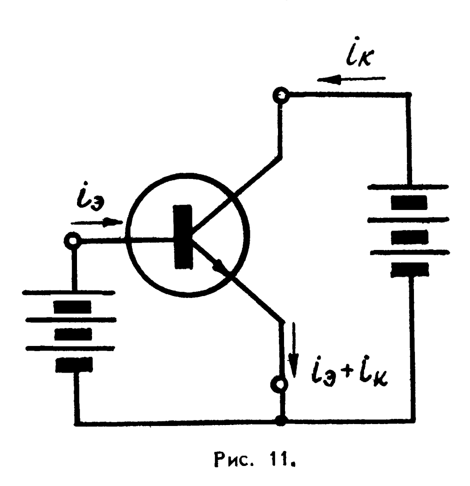


Рис. 11.

Вернемся к механизму, показанному на рис. 6. Выше мы уже обращали внимание на исключительную важность того обстоятельства, что сила P в этом механизме направлена перпендикулярно направлению

действия силы F. Это означает, что сила P никак не участвует в создании силы F. Можно сказать иначе — сила P не является частью силы F. Справедливо и обратное — сила F не является частью силы P.

Подойдем к рассмотрению работы механизма, показанного на рис. 6, еще и с энергетических позиций. Это позволит нам выделить два независимых процесса. Один процесс состоит в том, что часть энергии, получаемой от источника, заставляющего вращаться вал, благодаря наличию трения как бы ответвляется в веревку и участвует в создании силы F. Если веревка не закреплена неподвижно, а прикреплена, например, к грузу, который может перемещаться, то энергия, ответвившаяся в веревку, будет затрачена на совершение работы по перемещению груза. Стоит указать здесь, что еще одна часть энергии обязательно будет при этом затрачена на нагревание веревки и поверхности вала в месте их соприкосновения, т. е. перейдет в тепло. Это потери, неизбежные при работе всякого механизма. Но главное, что и энергия, затраченная на перемещение груза, и энергия, затраченная на нагревание, поступают только от источника, вращающего вал. Выше мы оговаривались, что мощность источника, вращающего вал, предполагается неограниченно большой. Это необходимо, потому, что в противном случае вал может остановиться.

Второй процесс связан с действием силы P. Действие этой силы также может сопровождаться затратами энергии, например на деформацию (сплющивание) веревки. Но опять-таки главное здесь в том, что сколько бы мы ни черпали энергию от источника, создающего силу P (это количество энергии, вообще говоря, может быть достаточно велико, поскольку сила P больше силы F), сила P только создает условия для ответвления части энергии источника в веревку.

Подойдем, наконец, к тому же вопросу с уже знакомых нам позиций черного ящика. Механизм, показанный на рис. 6, можно рассматривать как черный ящик, на входе которого действует сила P, а на выходе — сила F. На этот раз внутри ящика помещен также источник энергии. Такие черные ящики принято называть *активными*. Вход P и выход F связаны между собой уже известным соотношением пропорциональности $F=\alpha P$. Но это соотношение справедливо только для сил, а не для работ, которые могут совершаться под действием этих сил. Работа силы F, совершаемая в том случае, если веревка перемещает груз, целиком определяется энергией, получаемой от источника, а работа силы P в идеальном случае, когда веревка несжимаема, вообще равна нулю.

Все сказанное выше справедливо и для транзистора, хотя здесь вводятся в действие гораздо более тонкие физические процессы, и вообще для всякого усилителя. Поэтому теперь мы вправе определить усилитель как черный ящик, вход и выход которого связаны соотношением пропорциональности. Однако давая такое определение, нельзя ни на минуту забывать обо всем, что было сказано выше. В частности, все эти соображения не позволяют отнести к усилителям обыкновенный рычаг, для которого также справедливо соотношение пропорциональности между силами, приложенными к его концам, но у рычага работа силы, прилагаемой к одному концу, в точности равна (при отсутствии потерь) работе, совершаемой на другом конце. Именно поэтому название «усилитель» кажется нам неправильным. Скорее, это регулятор, поскольку основная его функция есть не что иное, как регулирование процесса обмена энергией между источником и выходом.

Заметим, наконец, что введенное выше условие, не позволяющее коэффиценту α (он называется коэффициентом усиления) быть большим единицы, в общем случае совсем не обязательно. Более того, вход и выход черного ящика — усилителя могут иметь различную природу, и тогда вопрос об истинной величине коэффициента усиления вообще теряет смысл, поскольку эта величина становится зависимой от выбранных единиц измерения. Чтобы показать это, рассмотрим, например, водопроводный кран, который также представляет собой усилитель. Поворачивая маховичок крана, мы поднимаем или опускаем заслонку и тем самым регулируем расход воды. Заметим, что и тут заслонка перемещается перпендикулярно направлению движения струи. На входе здесь перемещение, а на выходе действие, совершаемое водяной струей — к водопроводному крану можно подсоединить, например, картофелечистку. В зависимости от того, в каких единицах мы измеряем вход (перемещение), миллиметрах или оборотах маховичка, а также выход, в числе очищенных картофелин или количестве калорий, мы можем получить коэффициент усиления как больший, так и меньший единицы.

Но случай, когда коэффициент усиления безразмерен (т. е. представляет собой отношение двух величин одной физической природы) и меньше единицы (но больше 0,5), представляет для нас особый интерес, поскольку он позволяет продемонстрировать еще одно замечательное достижение человеческого разума, так называемую положительную обратную связь. Положительная обратная связь возникает в том случае, когда выход черного ящика полностью или частично возвращается на его вход (поэтому связь обратная) и суммируется с входной величиной (поэтому связь положительная). Выше было показано, что если только мы располагаем усилителем с коэффициентом усиления, меньшим единицы, но большим 0,5, то, вводя в действие положительную обратную связь, мы можем получить усилитель с коэффициентом усиления, большим единицы, а соединяя такие усилители последовательно, можем получить систему со сколь угодно большим коэффициентом усиления.

Не надо, однако, придавать слишком большое значение величине коэффициента усиления. Главное свойство усилителя, каким бы он ни был, механическим или электронным, гидравлическим или магнитным, это все же способность регулировать поток энергии. Например если у механизма, показанного на рис. 6, конец веревки привязать не к крюку, вделанному в стену, а к длинному плечу рычага, то на конце короткого плеча мы можем получить сколь угодно большую силу (ее величина зависит от соотношения плеч), а работа, которую может совершить эта сила, опять-таки зависит только от мощности источника. Оборачивая веревку вокруг вала несколько раз, мы получаем механизм с более простой конструкцией и только. Что же касается положительной обратной связи, то ее можно использовать лишь в тех случаях, когда коэффициент усиления больше 0,5. В противном случае положительная обратная связь приведет не к увеличению, а к уменьшению коэффициента усиления.

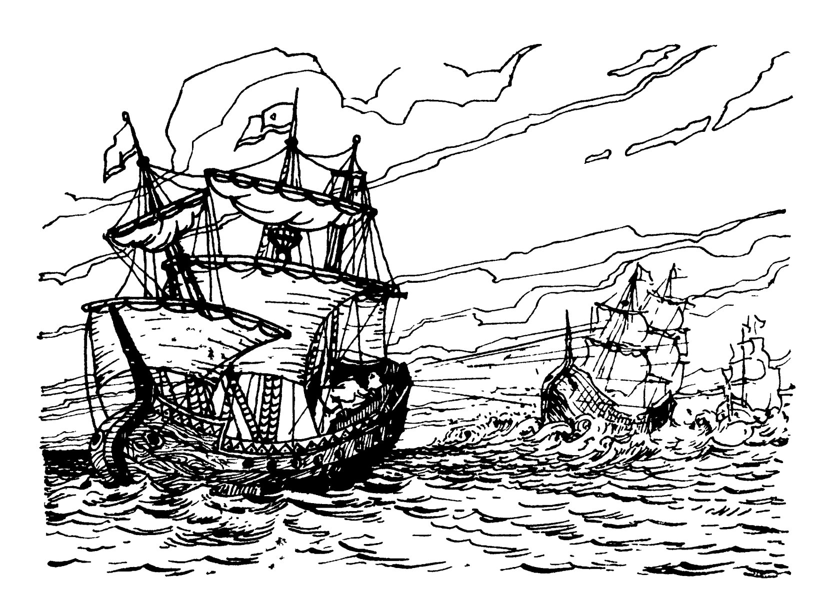
В этой главе авторы явно изменили принятым решениям и еще ни слова не сказали о мамонтах и мыле, об автомобилях и лягушках. Спешим наверстать упущенное. Начнем с мамонтов, хотя, наверное, это и бесполезно, поскольку читатель сам уже давно догадался, что перемещение верхнего конца шеста есть не что иное, как процесс регулирования обмена энергией, накопленной в камне, между самим этим камнем и головой мамонта. Не обладая должной выдержкой,

мы уже проговорились в первой главе, что конец шеста перемещается перпендикулярно по отношению к направлению падения камня. Это последнее замечание должно устранить всякие сомнения в справедливости проводимой аналогии. Но вот мыло? Хотя и здесь все понятно — мыло понадобилось нашему предку для того, чтобы увеличить коэффициент усиления. Мыло — и никакой положительной обратной связи.

Ну, а есть ли усилитель в автомобиле? Конечно, правда, там он носит скромное название заслонки карбюратора. С помощью этой заслонки регулируется обмен химической энергией, заключенной в бензине, между бензобаком и двигателем. Чем с большей силой мы нажимаем на акселератор, тем шире открывается заслонка, тем большее количество бензино-воздушной смеси поступает в двигатель, тем больше усилие, развиваемое на валу этого двигателя, а затем и на колесах. Как видите, вход и выход здесь имеют даже одинаковую физическую природу. Более того, автомобиль, выкрашенный в черный цвет, мы можем называть черным ящиком с гораздо большим основанием, чем что-либо другое.

Мышечные клетки лягушки — тоже усилители. Процесс преобразования накопленной в клетках химической энергии в энергию сокращения этих клеток регулируется сигналами, поступающими по нервам Однако на этот раз мы избавим читателя от обсуждения подробностей физиологии мышечной системы. Наверное, все ясно и так,

В заключение этой главы вернемся еще раз к нашим мамонтам. Оказывается, ловушка для мамонтов — это очень сложная конструкция, в состав которой входят и контрольно-измерительная система и усилитель. Но зот обсуждению того, что получается при соединении друг с другом этих двух частей, явно имеет смысл посвятить отдельную главу.



«...В отчаянии я взглянул на часы... Я позвал своего слугу — того самого, который слышал, как растет в поле трава, — и спросил его, не слышит ли он топота ног моего скорохода. Он приложил ухо к земле и сообщил мне, к моему великому горю, что бездельник скороход заснул!... Я крикнул другого слугу, того самого, который целился в воробья... Он выстрелил в вершину того дуба, под которым спал скороход. Желуди, листья и ветви посыпались на спящего и разбудили его... Я позвал своего силача. Он взвалил себе на плечи все золото, которое было в кладовых у султана, и мы побежали к морю. Там я нанял огромный корабль и доверху нагрузил его золотом... Султан пришел в ярость и послал за мной вдогонку весь свой военный флот... Вдруг ко мне подошел мой слуга, тот, у которого были могучие ноздри. «Не бойтесь, они нас не догонят!» — сказал он со смехом, побежал на корму и, направив одну ноздрю против турецкого флота, а другую против наших парусов, поднял такой ужасный ветер, что весь турецкий флот отлетел от нас обратно в гавань».

Подобное вступление с очевидностью свидетельствует о том, что предметом очередного нашего обсуждения будут

ЧЕТВЕРО СЛУГ

(ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ)

Действительно, как не распознать среди слуг барона Мюнхаузена наших хороших знакомых. Тут и датчик (слуга, который слышит, как растет трава), и линия связи (слуга, который передал сигнал, выстрелив в вершину дуба), и, конечно, усилитель (силач). В последнем случае почти совпадают даже термины. Но что же та-

кое этот четвертый? Чтобы как-то прояснить положение, приведем еще одну цитату из тех же приключений барона Мюнхаузена.

«... Смотрим — у дороги стоит человек огромнейшего роста и держит в руках веревку, которую он накинул петлею вокруг всего леса. «Что ты тащишь?» — просил я его. «Да вот понадобилось дров нарубить, а топор у меня дома остался, — ответил он. — Я и хочу изловчиться, чтобы обойтись без топора». Он дернул за веревку, и огромные дубы, как тонкие былинки, взлетели в воздух и упали на землю. Я, конечно, не пожалел денег и тотчас же пригласил этого силача к себе на службу».

Что же наиболее примечательно в этой истории, рассказанной «самым правдивым человеком на земле»? Перед нами существо, располагающее, как теперь принято говорить, неограниченными энергетическими ресурсами. Несмотря на это, используя только свои естественные средства, силач не может решить даже столь простую задачу, как нарубить дров. В буквальном смысле этого слова, руки коротки или если угодно, видит око, да зуб неймет. И вот тут-то на помощь приходит благословенная веревка. Эта веревка уже выручила нас однажды в предыдущей главе и еще не раз будет выручать в дальнейшем, но в данном случае веревка выступает в новой роли. Это уже не составная часть усилителя, а то, что мы назвали выше исполнительным механизмом.

Задача исполнительного механизма, вкратце, состоит в том, чтобы преобразовать простые движения, получаемые на выходе усилителя, в другие, сложные движения, необходимые для выполнения той или иной работы. При этом энергия, необходимая для выполнения работы, берется от усилителя или, чтобы быть строгим, от источника питания усилителя, поскольку сам усилитель, как было показано в предыдущей главе, осуществляет лишь регулирование потока этой энергии.

Если читатель захочет проверить только что высказанное утверждение, ему достаточно мысленно проследить, как перемещались отдельные части веревочного кольца, когда валились деревья охваченного кольцом леса.

Конечно, нам могут возразить, что, например, вилка, а это типичный исполнительный механизм, используется совсем не для того, чтобы усложнить движение руки при еде. Но дело как раз в том и состоит, что рука — это тоже исполнительный механизм. Беря в руку вилку, мы лишь несколько усложняем конструкцию такого механизма, преследуя при этом побочную цель, на этот раз гигиеническую.

Другой пример исполнительного механизма — лягушачья лапка. Природа достигла великого совершенства именно в конструировании исполнительных механизмов. Колесо автомобиля — тоже исполнительный механизм. Однако каждый, кому хоть раз довелось проехать на автомобиле по раскисшему осеннему глинистому проселку, знает, сколь беспомощной оказывается тут техника. Привод на передние и задние колеса, гусеницы — все это может спасовать перед таким элементарным препятствием, как небольшое болотце, форсировать которое для лягушки не составит ни малейшего труда.

А весь секрет в конструкции, называемой пальцами. Именно благодаря пальцам обеспечивается наилучшее сцепление с поверхностью земли, столь необходимое для толчка при прыжке, а в случае необходимости те же пальцы, соединенные перепонками, превращаются в идеальные весла. Нося обувь, мы сознательно ограничиваем эту предоставленную нам возможность. Но каждый знает, что если вы

оказались на глинистой тропинке после хорошего дождика, то лучший способ предотвратить падение в грязь — немедленно разуться и идти босиком

Обобщая наш пешеходный, а заодно и автомобильный опыт, мы можем сделать следующие выводы. Усилители, будь то естественные (мускулы) или искусственные (автомобильный двигатель), способны реализовать на своем выходе лишь весьма простые движения. Это, как правило, либо возвратно-поступательное (вспомним веревку кабестана), либо вращательное движение Чтобы использовать энергию, имеющуюся на выходе усилителя, для выполнения какой-либо, даже несложной, работы необходимо преобразовать эти простые виды движения в более сложные. Таким преобразованием занимаются исполнительные механизмы

Пример природного исполнительного механизма — кости лягушачьей лапы, соединенные шарнирами (суставы). На языке техники — это шарнирно-рычажный механизм. К костям прикреплены мышцы. Каждая из них может только сокращаться или вытягиваться, т. е. совершать возвратно-поступательное движение. А вот в результате согласованного действия мышц и костей и получается все разнообразие движений, которое может совершать лягушка.

Но достаточно о лягушках — в конечном итоге эта книга посвящена все-таки технике. Еще каких-нибудь 20 лет тому назад редкими были случаи, когда, совершая прогулку по городу, вы не сталкивались с толпой мальчишек, а подчас и взрослых, завороженно следящих за работой экскаватора или снегоочистителя. Сейчас такое встречается все реже и реже. Действительно, когда по поверхности Луны разгуливает чудо нашей советской техники «Луноход-1», когда можно вылететь из Новосибирска в 14 *ч* 15 *мин* и приземлиться в Москве в 14 *ч* этого же дня, когда машины пишут стихи, стоит ли обращать внимание на какой-то там экскаватор. А зря! Наблюдая за работой исполнительных механизмов, которые современный человек встречает, кстати говоря, буквально на каждом шагу, сегодня, как и 20, а может быть, и 200 лет тому назад, можно узнать чрезвычайно много поучительного. Подчас просто восторгаешься гениальной простотой отдельных находок человеческого разума.

На приемном экзамене по математике в одном из московских вузов абитуриенту однажды был задан вопрос: как запрячь в телегу двух лошадей так, чтоб обе работали одинаково интенсивно? Вопрос вызвал справедливое возмущение — какое отношение имеют лошади к математике! Да и вообще среди тех, кто поступает в вузы, вполне могут встретиться ребята, ни разу в жизни не видавшие живой лошади Но поразительно то, что на этот вопрос не смог ответить никто из наших знакомых, включая кандидатов и докторов технических наук.

Ответ явно стоит того, чтобы о нем задуматься. Сущность его состоит в следующем. К передку телеги привязывается один конец веревки, а второй ее конец — к середине горизонтальной палки К концам этой палки привязываются еще две веревки — за них-то и тянут лошади. Конечно, каждый из элементов подобного механизма имеет свое название, однако мы сознательно уклоняемся от использования здесь специальной терминологии. А секрет работы механизма гениально прост (рис. 12). Стоит одной из лошадей хотя бы немного ослабить усилие, палка немедленно повернется вокруг своей средней точки и это послужит сигналом кучеру (все-таки не обошлось без терминологии) принять соответствующие меры.

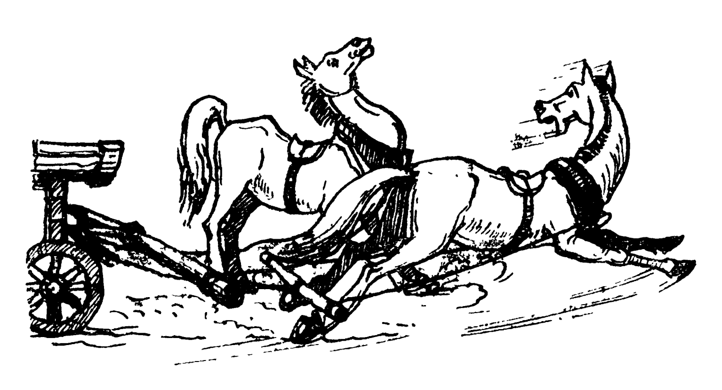


Рис. 12.

Пусть лошади — это анахронизм, но уместно напомнить читателю, что археологи и историки до сих пор не знают, чем человек начал пользоваться раньше — лошадью в качестве тяговой силы или колесом. А ведь наш «Луноход-1» передвигается по поверхности Луны с помощью все тех же колес. Ковш 25-тонного экскаватора приводится в движение тросами, т. е. в конечном итоге теми же веревками. Однако если читатель настаивает, мы можем привести пример и посовременнее.

На рис. 13 показан механизм снегопогрузчика, точнее, части этого механизма. Эта часть состоит из лотка, нижняя сторона которого подводится под основание снежной кучи, и двух лап, шарнирно соединенных с двумя вращающимися кривошипами. На рисунке показаны последовательные стадии работы механизма и хорошо видно, как пока одна лапа загребает снег и отправляет его на транспортер, вторая занимает исходное положение. Затем лапы меняются ролями. Это прекрасный пример тому, как с помощью элементарного механизма простое вращательное движение кривошипа превращается в сложное и весьма полезное движение лап.

Задумывался ли кто-нибудь из читателей над тем, как работает швейная машина? А как человек шьет вручную?

Чтобы сделать стежок, он должен проткнуть иголку с одной стороны ткани и вытащить ее с другой. В одной руке вы держите сшиваемый материал, значит, последовательность действий должна быть следующей. Одной (обычно правой) рукой вы протыкаете иголку примерно до половины, затем отпускаете иголку, которая удерживается в материале только силой трения, перемещаете руку так, чтобы она оказалась с другой стороны материала, вытаскиваете иголку и продолжаете движение руки, пока вся нитка не протянется сквозь образовавшееся отверстие. Затем описанная последовательность действий повторяется.

Основная проблема, возникающая при автоматизации подобного технологического процесса, состоит в том, что вряд ли можно мыслить себе станок, в котором рабочий инструмент (игла) хотя бы на некоторое время оказывается полностью свободным, т. е. механически не связанным с какими-либо другими деталями станка, как это имеет место в то время, пока вы переносите руку от одного конца иголки

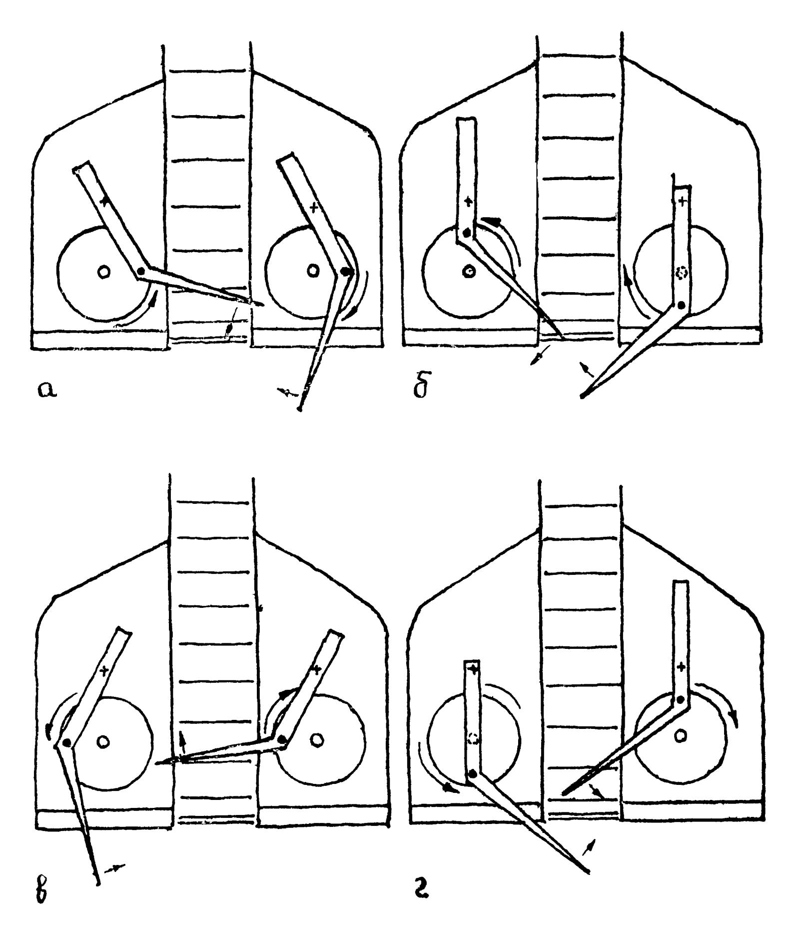


Рис. 13.

к другому. Заметим, что аналогичная ситуация возникает также в ткацких станках или, если приводить совсем уже современные примеры, в автоматических станках для намотки тороидальных сердечников, широко используемых в радиоэлектронной аппаратуре. В двух последних случаях челнок с ниткой или проводом, пока вы перехватываете, не удержится даже силой трения, поэтому при ручной намотке тороидальных сердечников приходится работать двумя руками, а сердечник удерживать с помощью какого-нибудь механического приспособления.

Существует и вторая проблема, связанная со свободным участком нитки, тянущейся за иголкой. Каждый мужчина, которому хоть однажды приходилось пришивать себе пуговицу, хорошо знает, что

если взять нитку подлиннее, то она обязательно запутается, а если взять нитку покороче, то пуговицу придется скоро пришивать заново.

Как же решаются обе эти проблемы в швейных машинах? Начнем с того, что для выполнения шва в швейной машине используется не одна нитка, а две. Каким получается шов, видно на рис. 14 Однако, если читатель попробует выполнить такой шов вручную, он немедленно убедится, что без перехватывания иголки здесь снова не обойтись.

Схематическая конструкция швейной машины показана на рис. 15. Швейная машина — это очень сложный механизм, содержащий большое количество узлов. Мы выделим только те из них, которые необходимы для описания принципа действия. Одна из двух ниток, составляющих шов, намотана на катушку. Катушка может свободно вращаться на оси, укрепленной в верхней части машины. Сматываясь с катушки, нитка огибает тормоз, затем поднимается вверх, проходит сквозь ушко нитенатягивающего рычага, снова опускается вниз и проходит сквозь отверстие в иголке. Весьма интересно, что в данном случае отверстие в иголке (ушко) расположено вблизи острия иголки, а не с противоположной стороны, как это делается в иголках, которыми шьют вручную.

Вторая из двух ниток, составляющих шов, намотана на катушку специальной конструкции, называемую шпулькой. Шпулечный механизм состоит как бы из двух горшков, вложенных один в другой



Рис. 14.

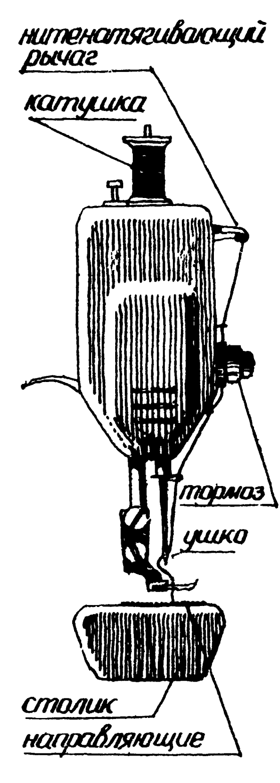


Рис. 15.

(рис. 16). Внешний горшок жестко укреплен на оси и вращается с постоянной скоростью от общего привода швейной машины. Внутренний горшок расположен во внешнем так, что между их стенками повсюду имеется зазор — в этот зазор проходит нитка. Внутренний горшок не вращается. Для того чтобы внешний горшок при своем вращении не увлек внутренний, последний удерживается специальным рычагом, конец которого входит в вырез в стенке внутреннего горшка. Но между концом рычага и вырезом опять-таки имеется зазор.

Третий узел, который представляет для нас интерес, это столик, на который кладется сшиваемый материал. В столике имеются специальные направляющие, передвигающие материал после каждого стежка. Кроме того, в столике имеется отверстие, сквозь которое проходит иголка. Рабочий столик хорошо виден на рис. 15.

Для того чтобы понять, как работают все эти узлы, обратимся теперь к рис. 17, где показано несколько промежуточных положений основных деталей механизма швейной машины. На рис. 17, *а* иголка и нитенатягивающий рычаг находятся в своих верхних положениях. Положение всех деталей на рис. 17, *а* мы примем за исходное. Начиная с исходного положения, иголка движется вниз, протыкает сшиваемый материал и занимает крайнее нижнее положение. Заметим, что все время, пока двигалась иголка, нитенатягивающий рычаг оставался неподвижным в своем верхнем положении. Внешний горшок шпулечного механизма повернулся при этом на некоторый угол. Положение всех деталей после завершения описанных действий показано на рис. 17, *б*. Из этого положения иголка начинает подниматься вверх, а нитенатягивающий рычаг опускается вниз. Подобные движения иголки и рычага приводят к тому, что нитка, проходящая сквозь ушко иголки, освобождается и образует небольшую петлю. В эту петлю входит зуб, имеющийся на внешнем горшке. Положение всех деталей механизма, соответствующее только что описанным действиям, показано на рис. 17, *в*

Далее иголка продолжает подниматься вверх, а нитенатягивающий рычаг опускаться вниз. Свободная петля нитки увеличивается, и ее увлекает за собой зуб внешнего горшка рис. 17, *г*. Часть петли при этом входит внутрь внешнего горшка и огибает внутренний. Положение деталей механизма, соответствующее крайнему верхнему положению иголки и крайнему нижнему положению нитенатягивающего рычага, показано на рис. 17, *д*.

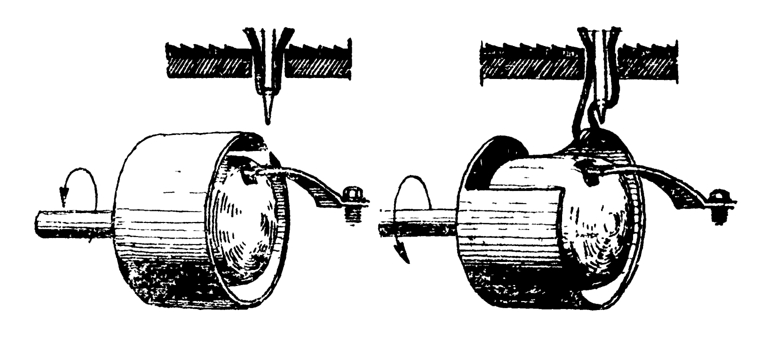


Рис. 16.

Теперь иголка остается неподвижной, нитенатягивающий рычаг начинает подниматься вверх, а внешний горшок шпулечного механизма вместе с зубом продолжает вращаться. Петля нитки, увлекаемая зубом, продолжает охватывать внутренний горшок. Одно из промежуточных положений деталей показано на рис. 17, *е*.

Когда внешний горшок шпулечного механизма совершает примерно три четверти оборота, петля нитки, захваченная зубом, освобождается и благодаря действию нитенатягивающего рычага, который продолжает двигаться вверх, она вытягивается из внутренней полости внешнего горшка. Процесс завершается, когда все детали снова оказываются в положении, показанном на рис. 17, *а*.

Легко видеть, что весь описанный процесс привел к получению нового стежка, потому что внутренний горшок вместе с заключенной в нем шпулькой был как бы протащен сквозь петлю верхней нитки. На самом деле все, конечно, происходит наоборот. внутренний горшок остается неподвижным, а петля нитки, увлекаемая зубом внешнего горшка, огибает его, как бы пропуская сквозь себя.

Конечно, это лишь весьма упрощенное описание работы механизма швейной машины. Реальный механизм содержит, кроме того, большое количество фигурных деталей — отражателей, направляющих движение петли нитки так, чтобы она не запутывалась. Нитка, сматывающаяся со шпульки, удерживается специальной тормозной пружиной, которая обеспечивает правильное ее натяжение.

Совместное действие всех деталей, показанных и не показанных на наших рисунках, приводит к тому, что каждый участок нитки описывает чрезвычайно сложную траекторию, а результатом всего этого является то, что шпулька, расположенная во внутреннем горшке, вместе с внутренним горшком проходит сквозь петлю.

Мы привели здесь довольно сложный пример для того, чтобы показать, как в результате согласованных действий отдельных механизмов, совершающих лишь простейшие возвратно-поступательные или вращательные движения, удается осуществить технологический процесс, требующий, вообще говоря, значительно более сложных движений.

Признаемся, правда, что, выбирая в качестве примера именно швейную машину, мы преследовали еще одну цель. Сам процесс шитья освоен человеком еще с древнейших времен, когда вместо

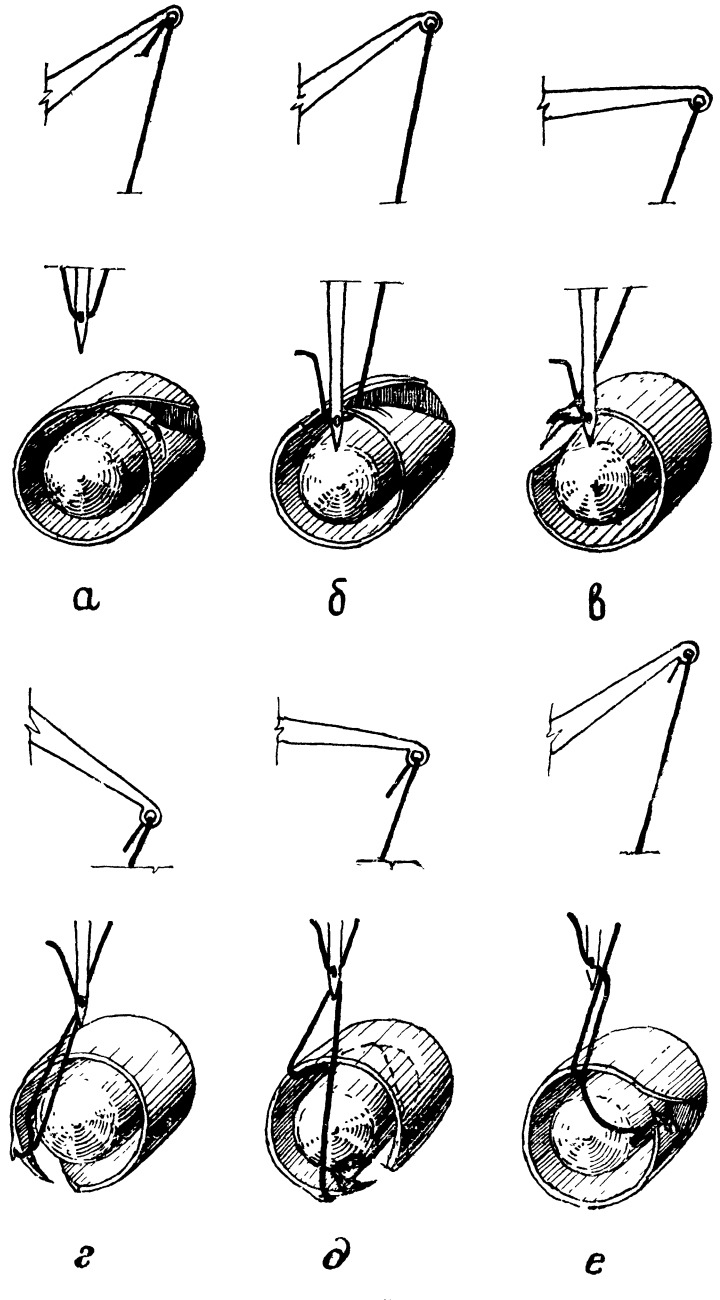


Рис. 17.

иголок пользовались заостренными костями, а вместо ниток — жилами животных или волокнами растений. Каждый умеет шить и тем более каждый знает, что это занятие требует определенных навыков, приобретаемых в процессе обучения. Чему же, собственно, мы учимся, учась шить? Грубо говоря, мы учимся правильно двигать пальцами. Но каждое движение пальцами, сколь бы сложным оно ни было, складывается из отдельных элементарных движений костей руки, а это всегда лишь вращательные движения, поскольку каждая отдельная кость может лишь поворачиваться в своем шарнире — суставе. Чтобы привести в движение, например, косточку средней фаланги указательного пальца, нужно привести в действие соответствующую мышцу. Теперь мы легко можем прийти к выводу, что научиться шить — это значит научиться согласовывать движения отдельных мышц. К слову сказать, то же самое необходимо для того, чтобы научиться ходить.

Процесс шитья на швейной машине, конечно, сильно отличается от процесса шитья вручную. Но в главном они похожи — и в том и в другом случае результат достигается благодаря согласованному действию простейших механизмов, каждый из которых совершает лишь элементарные движения. Наша цель состояла именно в том, чтобы подчеркнуть эту аналогию.

Казалось бы, настало время задать вопрос, который, вообще-то говоря, является главным среди всего круга вопросов, рассматриваемых в этой книге. Если работа исполнительного механизма сводится к согласованию отдельных простых действий, то каким же образом осуществляется это согласование? Но не будем торопиться и отложим рассмотрение этого вопроса до следующей главы. А пока сделаем последнее наблюдение, касающееся работы исполнительных механизмов.

Выше мы неоднократно обращали внимание читателя на тот факт, что исполнительные механизмы способны совершать чрезвычайно сложные действия. Теперь нам хочется заметить, что сложность, как таковая, сама по себе далеко не всегда является достоинством. Рассмотрим снова работу швейной машины, на этот раз с несколько иных позиций. Допуская некоторую вольность, можно сказать, что швейная машина имеет четыре руки. Первая держит иголку, вторая (нитенатягивающий рычаг) натягивает нитку, третья держит шпульку и пропускает ее сквозь петлю в нитке и, наконец, четвертая рука — это рабочий столик, удерживающий и передвигающий сшиваемую ткань. Именно потому, что рук четыре, каждая из них может ограничиться лишь простейшими движениями. Наверное, если бы у человека также было четыре руки, то научиться шить ему было бы гораздо легче. Правда, вопрос о согласовании движений рук по-прежнему пока оставляем в стороне.

Отметим лишь тот факт, что увеличение количества рабочих органов исполнительного механизма, во всяком случае на примере швейной машины, сопровождается как упрощением конструкции каждого из них, так и повышением производительности механизма в целом. Последнее утверждение пока еще не слишком очевидно, поэтому рассмотрим еще один пример.

Пусть на сей раз это будет экскаватор (рис. 18, *а*). Рабочий цикл обычного ковшового экскаватора состоит из двух основных частей. В течение первой, рабочей, части ковш захватывает грунт, поднимается и переносится в горизонтальной плоскости. Затем открывается дно ковша и грунт высыпается либо на отвал, либо в кузов грузо-

Рис. 18 а.

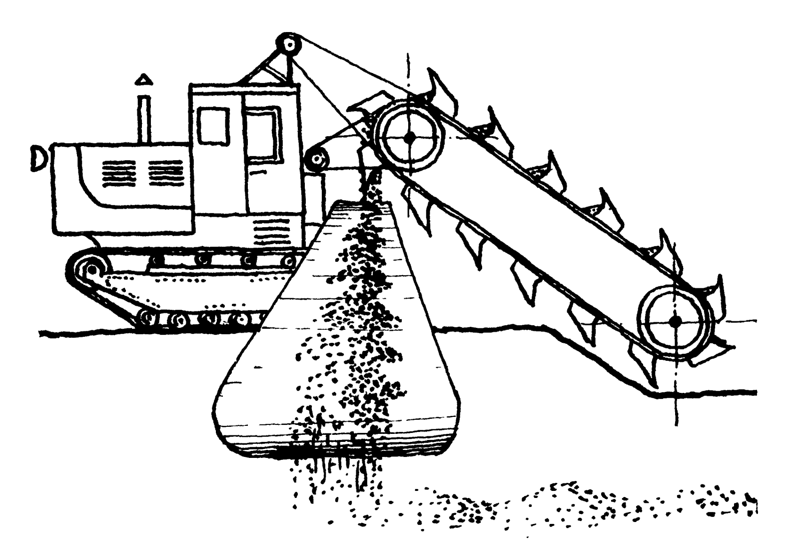


Рис. 18 б.

вика. В течение второй, холостой, части цикла ковш совершает ту же траекторию, но в обратном направлении и возвращается в котлован. Полезная работа, как таковая, выполняется только в течение первой части цикла, и в то же время длительность обеих частей примерно одинакова. Иными словами, полезная работа совершается лишь примерно в течение половины общего рабочего времени экскаватора. Заметим попутно, что ковш экскаватора совершает подчас весьма сложную траекторию и это требует от того, кто им управляет, т. е. экскаваторщика, определенных навыков, напряженного внимания и достаточно интенсивной работы рычагами.

Иначе работает роторный экскаватор. Здесь имеется много ковшей, обычно меньшего размера, укрепленных на ободе вращающегося колеса. Ковш, который в данный момент находится внизу, захватывает грунт (рис. 18, *б*), затем по мере вращения колеса ковш с грунтом поднимается, достигает наивысшей точки, начинает переворачиваться и содержащийся в нем грунт высыпается на ленту транспортера. Ковш продолжает свое путешествие уже пустым до тех пор, пока снова не окажется внизу. Каждый отдельный ковш здесь, так же как и в случае одноковшового экскаватора, в течение одной половины оборота колеса совершает полезную работу (захватывает и поднимает грунт), а в течение второй половины оборота путешествует вниз порожняком. Но весь секрет как раз в том и состоит, что пока одни ковши опускаются, другие ковши, укрепленные с противоположной стороны колеса, поднимаются. Таким образом, ни одна минута рабочего времени не пропадает впустую. Управление роторным экскаватором неизмеримо легче. По существу оно сводится лишь к управлению движением экскаватора в целом, поскольку каждый ковш движется по простейшей круговой траектории. Не надо также открывать дно ковша, потому что для высыпания грунта он попросту переворачивается. Справедливости ради следует что, роторный экскаватор далеко не всегда может заменить ковшовый. Роторный экскаватор работает в легко доступных местах, но зато производительность его гораздо выше.

В современной технике, пожалуй, именно исполнительные механизмы — самые распространенные и самые разнообразные устройства: от тончайших приборов, позволяющих препарировать бактерию на предметном стекле микроскопа, до гигантских шагающих экскаваторов, поднимающих в своем ковше столько грунта, что им можно почти заполнить целый железнодорожный вагон; от чугунной болванки, заколачивающей сваи, до станка, изготовляющего ковры с тончайшим узором. Поэтому сколько бы мы ни приводили здесь примеров, мы все равно не охватим даже малой части существующих в настоящее время механизмов. А если так, то не остается ничего другого, как вернуться к мамонтам.

Есть ли исполнительный механизм в ловушке для мамонтов? Конечно, есть. Это все тот же камень, выполняющий работу, ради которой и была построена ловушка. Движение камня — простейшее из простых, оно даже не возвратно-поступательное, а просто поступательное (точнее, падение). Но вот проблема согласования движения камня с движением остальных частей ловушки играет здесь ничуть не менее серьезную роль, чем в любом ультрасовременном исполнительном механизме. Камень должен начать падать в строго определенный момент времени, иначе вся затея не имеет смысла.

Констатируя с сожалением, что в этой главе ни разу не было упомянуто мыло, авторы приглашают читателя перевернуть страницу.



« — Где же мы будем копать? — спросил Гек.

— О, повсюду, в разных местах

— Разве клады зарыты повсюду?

— Конечно, нет, Гек. Их зарывают либо на каком-нибудь острове, под самым концом какой-нибудь ветки старого сгнившего дерева, как раз в том месте, куда тень от ветки падает в полночь; но всего чаще — в подпольях таких домов, где водятся привидения».

Как известно, затея Тома Сойера и Гека Финна на этот раз не завершилась успехом. Поэтому, нарушив традицию, мы не будем связывать с ними название этой главы, а скажем так:

ЧЕМ ДАЛЬШЕ, ТЕМ БЫСТРЕЕ

(ГЛАВА ПЯТАЯ)

— Но зачем же тогда такое вступление и причем здесь дома, в которых водятся привидения?

— А вы еще не заметили?

— Что, собственно, не заметил?

— Неужели вы еще не заметили аналогию между копателями клада и швейной машиной?

Давайте разберемся подробнее. Как поступает кладоискатель? Он приходит к старому дереву, находит самую длинную ветку и ждет (т. е. остается неподвижным), пока не наступит полночь. Затем он подходит к месту, куда падает тень от конца ветки, и начинает копать. Вряд ли стоит указывать, что в подавляющем большинстве случаев процесс циклически повторяется, если только кладоискатель не бросает свою затею после первой же неудачной попытки (Том и Гек повторяли).

Что, например, происходит с нитенатягивающим рычагом швейной машины? Он остается неподвижным, пока иголка не пройдет полный путь от верхнего до нижнего положения. Затем он опускается вниз и сразу же снова поднимается вверх. Затем этот процесс повторяется. Нечто подобное можно сказать и о многих других узлах швейной машины, за исключением шпульного механизма, который вращается непрерывно. Аналогия, которую мы хотим здесь подчеркнуть, состоит в том, что как кладоискатели, так и механизмы швейной машины действуют по определенной *программе*. Задавая программу для каждого отдельного механизма, мы обеспечиваем их согласованную работу.

Настало время ответить на вопрос, который мы сформулировали в предыдущей главе: что же обеспечивает согласованную работу механизма или, говоря уже по-новому, что задает программу их действий? В швейной машине эту задачу выполняет так называемый главный вал, с которым связаны кулачки и кривошипы. Главный вал приводится в движение от электродвигателя. Работа кулачков и кривошипов общеизвестна, поэтому мы не станем вдаваться в подробности и отметим только — именно потому, что каждый отдельный механизм приводится в движение своим кулачком или кривошипом, а все кулачки или кривошипы связаны с одним и тем же валом, и обеспечивается согласованность работы механизмов. Каждый механизм вступает в действие точно в положенное время и совершает все предназначенные ему движения.

Теперь перенесемся мысленно в театральный зал на концерт знаменитого пианиста. Играя, пианист совершает очень много различных движений. Он совершает движения головой (относятся ли эти движения к делу, предоставим судить музыковедам), он совершает движения ногами, нажимая на педали (это уже ближе к цели), и, наконец, что самое главное, он совершает движения пальцами и кистями рук. Процесс исполнения грустного вальса Шопена или огнедышащего этюда Скрябина распадается в конечном итоге на множество элементарных движений.

Пианист ударяет по клавишам. Движение клавиши через довольно сложную систему рычагов передается молоточку. Молоточек бьет по струне, заставляет ее вибрировать. Вибрация струны рождает звук, т. е. опять-таки движение, на этот раз — воздуха.

Все начинается с движения клавиши. Исполнение музыкального произведения в целом — это согласованное движение клавиш. Но нельзя ли приспособить к клавишам рояля вал с кулачками и кривошипами точно так, как это делается в швейной машине? Можно, и это делалось неоднократно. Многочисленные конструкции подобного рода были весьма распространены в конце прошлого века, пока на смену им не пришел фонограф Эдисона. Можно-то можно, а вот эффект получается совсем не тот. Работа даже самого изощренного механизма не идет ни в какое сравнение с игрой талантливого пианиста. Почему? Этот вопрос вызывал и, по всей вероят-

ности, еще долго будет вызывать яростные споры между физиками и лириками. Действительно, почему? Ведь современная техника позволяет воспроизвести движения гораздо более сложные, чем движения пальцев пианиста, и воспроизвести их с гораздо большей точностью, чем это делает сам пианист при повторном исполнении.

Дать исчерпывающий ответ на подобный вопрос равносильно тому, чтобы дать исчерпывающее объяснение понятию таланта, т. е. проверить алгеброй гармонию. Одно нам ясно — пианист отличается от механического исполнителя тем, что он *слышит* собственную игру. Человек, полностью лишенный слуха, не может быть талантливым пианистом.

На двух, даже очень похожих, роялях нужно по-разному ударить по клавише, чтобы получить один и тот же эффект. Поэтому только ощущая результат своих действий, пианист может достичь того, чего он хочет. Недаром рассказывают, что глухой Бетховен упирал конец палки в доску рояля, а второй конец этой палки брал в зубы.

Вернемся теперь с высот искусства на грешную землю. Приведем для начала небольшую цитату из книги Норберта Винера «Творец и робот» [1]: «Подверженный той лени, что является истинной матерью изобретений (от такой же лени другой мальчишка, работавший у машины Ньюкомена, прицепил как-то веревку от крана, впускавшего пар, к балансиру, создав тем самым первый автоматический клапан), гетевский ученик чародея запомнил отрывки подслушанных им заклинаний хозяина, произнес их и заставил метлу качать воду в бочку». Какую бездну размышлений рождает эта цитата! Мы обещаем читателю, что на страницах нашей книги еще рассмотрим вопрос о чародеях и их учениках и о лени — матери изобретений.

Но уж коли была упомянута веревка, то в первую очередь наше внимание будет приковано, конечно, к ней. Прежде чем говорить о веревке, следует сказать несколько слов о работе паровой машины Ньюкомена Как и современная паровая машина, машина Ньюкомена содержала цилиндр с перемещающемся в нем поршнем (рис. 19). Шток поршня соединялся с одним из концов коромысла, или балансира. Второй конец коромысла связывался с насосом, поднимавшим воду из угольной шахты.

Рабочий объем цилиндра с помощью трубки, снабженной краном, соединялся с паровым котлом. Неотъемлемой частью машины Ньюкомена был рабочий низкой квалификации, обычно мальчишка, функции которого состояли в следующем. Когда конец коромысла, связанный со штоком поршня, перемещался в самое нижнее возможное положение, мальчишка открывал кран. Пар из парового котла поступал в цилиндр и начинал выталкивать поршень. Поднимаясь вверх, поршень через шток перемещал коромысло. Через коромысло движение передавалось штоку водяного насоса. Так продолжалось до тех пор, пока конец коромысла, связанный с поршнем, не приходил в верхнее положение, в этот момент мальчишка закрывал кран, связывающий рабочий объем цилиндра с паровым котлом. Оставшийся в цилиндре и затративший свою энергию на совершение механической работы пар конденсировался (для этой цели в цилиндр еще наливали холодную воду), и поршень под воздействием атмосферного давления начинал перемещаться вниз. Когда поршень занимал

---

[1] Норберт Винер, Творец и робот. М., «Прогресс», 1966.

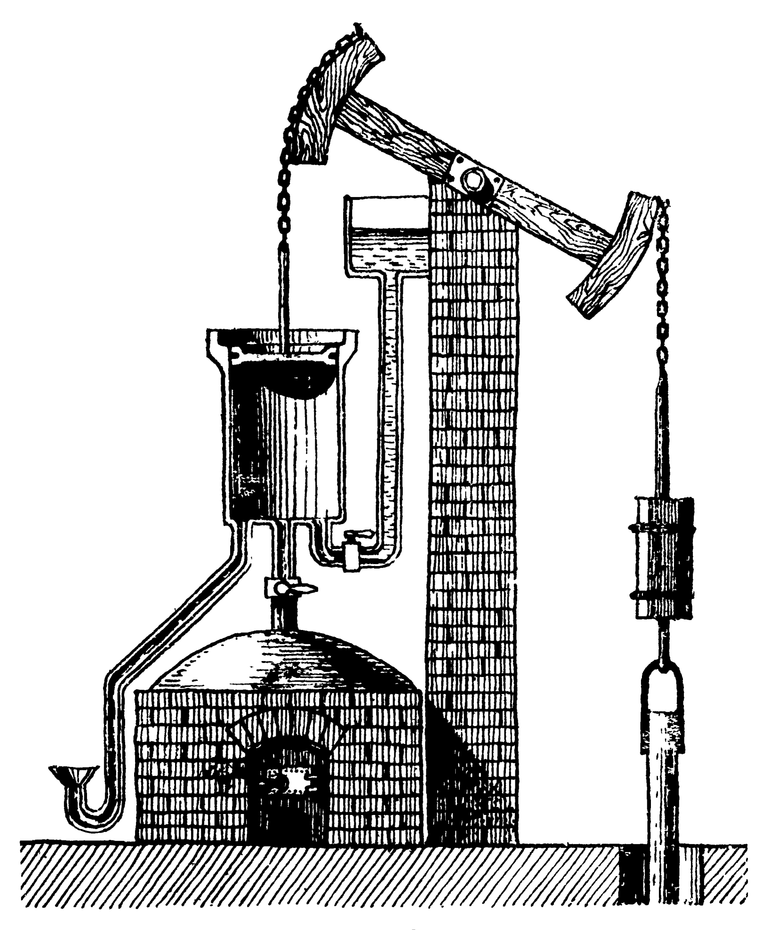


Рис. 19.

крайнее нижнее положение, мальчишка снова открывал кран и все повторялось сначала.

Сколь бы ни гневались на нас лирики, мы не можем не усмотреть здесь прямой аналогии с пианистом, играющим на рояле. Пианист *слышит* звуки, которые он извлекает из инструмента, и на основании того, что он слышит, корректирует свои действия. Мальчишка, приставленный к паровой машине Ньюкомена, *видит* положение коромысла и в соответствии с тем, что он видит, открывает или закрывает кран.

Но попробуйте простоять на одном месте в течение целого рабочего дня, выполняя столь однообразную и скучную работу! К то-

му же у мальчишки всегда есть свои мальчишечьи дела. И вот одному из таких мальчишек, говорят, его звали Генри Поттер, срочно понадобилось отлучиться. Чтобы не навлекать на себя гнев начальства, он взял веревку и привязал рукоятку крана к коромыслу. Так было осуществлено то, что сейчас принято называть обратной связью.

Не станем утверждать, что это случилось впервые, но факт остается фактом — машина продолжала работать, а человек перестал быть ее неотъемлемой составной частью. В современных паровых машинах механизм Генри Поттера остался практически без изменения. Только веревку заменили металлическим штоком, а кран с ручкой — парораспределительным механизмом, получившим название *золотника.* Поскольку у современных паровых машин, как правило, нет коромысла, шток золотника приводится в движение эксцентриком, укрепленным на валу маховика.

Прежде чем переходить к более подробному описанию свойств обратной связи, посмотрим, нет ли среди составных частей машины Ньюкомена наших старых знакомых. Ну, конечно же, есть! Поршень с цилиндром, подсоединенной к нему трубкой и краном — это типичный усилитель. Перемещение ручки крана, требующее затраты минимальных усилий (любой мальчишка может повернуть кран), сопровождается мощным перемещением поршня. Шток поршня, коромысло, шатун, кривошип и маховик — все это исполнительный механизм, преобразующий в данном случае возвратно-поступательное движение поршня во вращательное движение маховика. Глаз мальчика — это датчик, а его рука, протянутая к ручке крана, — линия связи.

Первое наблюдение, которое мы вправе сделать, состоит в том, что устройства, которые мы до сих пор рассматривали по отдельности, связаны здесь между собой, причем в совершенно определенной последовательности. Датчик через линию связи воздействует на усилитель, выход усилителя воздействует на исполнительный механизм.

Правда, нечто подобное мы уже наблюдали в ловушке для мамонтов. Но вспомним, что в ловушку попадались лишь очень глупые мамонты. Действительно, коснувшись лбом бамбукового шеста и переместив его настолько, что конец шеста перестал удерживать камень, мамонт приводил в действие механизм, который, начиная с этого момента, действовал уже по наперед заданной программе, причем данная программа не менялась, как бы ни вел себя в дальнейшем мамонт. Программа была простейшей и состояла в том, что камень падал вертикально вниз. Стоило мамонту, едва почувствовав прикосновение шеста ко лбу, отскочить в сторону, как затея с ловушкой теряла свое значение.

История не сохранила для нас данных, сумели ли мамонты выработать условный рефлекс на ловушки. Да и не в этом дело, важно другое. Если бы камень в своем полете мог изменять направление движения в соответствии с перемещением мамонта, ловушка действовала бы безотказно. Именно так обстоит дело в машине Ньюкомена: положение крана определяется положением коромысла. В рассмотренной нами последовательной цепи датчик воспринимает положение исполнительного механизма. В этом и заключена сущность обратной связи. Правда, в усовершенствованном варианте машины Ньюкомена одна и та же веревка выполняла функции и датчика и линии связи. Поистине неисчерпаемы возможности этой веревочки!

Сделанные нами наблюдения пока еще достаточно поверхностны. Мы установили, что поведение системы, состоящей из датчика, линии связи, усилителя и исполнительного механизма, определенным образом меняется, если датчик воспринимает положение исполнительного механизма. Другими словами, мы установили, что машина Ньюкомена, в известном смысле, совершеннее ловушки для мамонтов. Займемся теперь более углубленным изучением свойств обратной связи.

Прежде всего, несовершенство ловушки для мамонтов определяется не столько конструкцией самой ловушки, сколько поведением мамонта Если бы мамонт спокойно продолжал шагать, невзирая на помеху в виде бамбукового шеста, ловушка действовала бы безотказно. Разовьем это чрезвычайно важное наблюдение. Что произошло бы с машиной Ньюкомена, если бы мальчик убежал, не привязав веревки? Предположим, что он сделал это сразу же после того, как открыл кран. В течение определенного промежутка времени, а именно до тех пор, пока поршень не достиг своего наивысшего положения, отсутствие мальчика никак не сказалось бы на работе машины. Только после достижения поршнем наивысшей точки начинаются отклонения от нормального рабочего процесса. Пар, продолжающий поступать в цилиндр, стремится удержать поршень в верхнем положении, а инерция маховика стремится переместить его вниз. В результате машина останавливается, но, повторяем еще раз, это происходит только после того, как поршень достигнет наивысшей точки.

Сказанное приводит нас к чрезвычайно интересному выводу. Оказывается, обратная связь нужна не всегда, точнее, она бездействует, пока работа системы происходит в точном соответствии с некоторым заранее намеченным планом. Малейшее отклонение от такого плана — и обратная связь становится необходимой. Таким образом, мы снова приходим к понятию плана, или программы работы системы. Можем сказать и больше. В системе с обратной связью датчик должен воспринимать не столько положение исполнительного механизма, сколько различие между его истинным положением и тем, которое диктуется на данный момент времени планом, или программой. Чтобы сделать последнее положение более ясным, рассмотрим еще одно усовершенствование паровой машины, придуманное на сей раз Джемсом Уаттом.

Разберем принцип действия регулятора Уатта (рис. 20). Регулятор Уатта состоит из двух грузиков, укрепленных на качающихся рычагах. Рычаги укреплены на валу, причем этот вал связан передачей или просто представляет собой продолжение вала паровой машины. Под действием силы тяжести, а также под действием пружины грузы стремятся занять наинизшее положение, которое, очевидно, достигается тогда, когда оба груза прижаты к валу. При вращении вала под действием центробежной силы грузы стремятся разойтись в стороны, приподнимая при этом конец рычага, соединенного с заслонкой. Каждому значению скорости вращения вала соответствует строго определенное положение грузов, когда центробежная сила полностью уравновешивает силу веса и силу пружины. Каждому положению грузов в свою очередь соответствует определенное положение заслонки в трубе, подводящей пар к цилиндрам паровой машины.

План, или программа, состоит в данном случае в том, чтобы скорость вращения вала оставалась постоянной. Если так оно и есть на

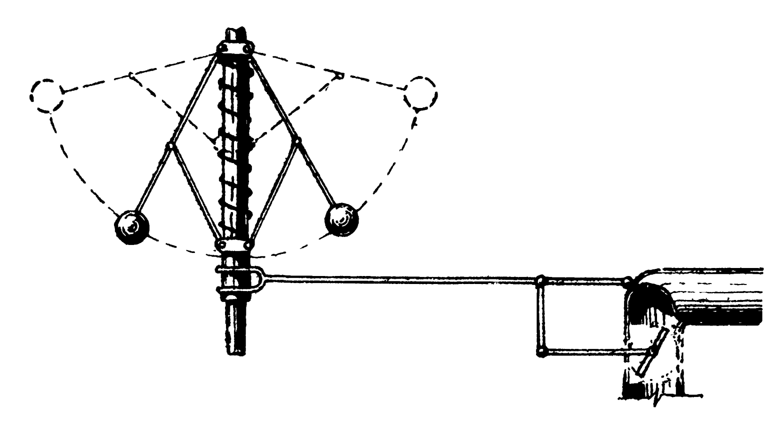


Рис. 20.

самом деле, постоянным остается положение грузов, постоянным остается и положение заслонки. Весь только что описанный механизм как бы отсутствует, во всяком случае, его наличие никак не сказывается на работе машины.

Предположим теперь, что по какой-либо причине, например в результате уменьшения нагрузки, скорость машины увеличилась. Увеличение скорости приводит к тому, что грузы расходятся в стороны, конец рычага поднимается и заслонка в трубе, подводящей пар, поворачивается таким образом, что проходное сечение становится меньше. Поступление пара в машину уменьшается, и это естественным образом влечет за собой уменьшение скорости машины. После того как скорость уменьшится, грузы опускаются вниз.

Пока скорость (регулируемый параметр) остается постоянной, наличие регулятора никак не сказывается на работе системы. Стоило скорости измениться или, иначе говоря, стоило значению регулируемого параметра оказаться не равным некоторому значению, предусмотренному программой, регулятор приходит в действие, причем это действие направлено на восстановление требуемого значения регулируемого параметра.

Конструкция регулятора Уатта позволяет нам сделать еще одно наблюдение. Увеличение скорости вала всегда влечет за собой закрывание заслонки, т. е. уменьшение количества подаваемого пара. Рассмотрев работу конструкции, показанной на рис. 20, легко сделать и другой вывод. Если бы скорость вала уменьшилась, грузы опустились бы вниз и это повлекло бы за собой открывание заслонки, сопровождающееся увеличением количества подаваемого пара.

Регулятор Уатта вместе с паровой машиной, к которой он подсоединен — это снова знакомая нам система Грузы, шарнирно укрепленные на вращающемся валу, представляют собой датчик — в данном случае датчик скорости. Тот, кто еще не забыл содержания второй главы, легко обнаружит, что в данном случае датчик выполняет функцию измерения и функцию преобразования. Скорость вала преобразуется в центробежную силу, эта сила сравнивается с силой веса груза и давления пружины — таким образом осуществляется из-

мерение. С помощью шарнирного механизма измеренная величина скорости преобразуется в механическое перемещение. Перемещение с помощью линии связи (рычаг) передается к усилителю (заслонка—цилиндр — поршень), а перемещение, реализуемое на выходе усилителя, с помощью кривошипно-шатунного механизма (исполнительный механизм) преобразуется во вращательное движение вала. Скорость вращения вала вызывает отклонение груза.

Итак, перед нами снова замкнутая система с обратной связью от исполнительного механизма к датчику. Важное новое наблюдение, которое мы сделали, рассматривая работу регулятора Уатта, состоит в том, что увеличение скорости сопровождается уменьшением подачи пара и наоборот. Иными словами, обратная связь работает таким образом, чтобы противодействовать причине, вызвавшей отклонение. Такая обратная связь называется *отрицательной*. Именно отрицательная обратная связь позволяет осуществить регулирование работы системы.

Чтобы последнее утверждение стало более очевидным, рассмотрим другую конструкцию регулятора, показанную на рис. 21. Из сравнения рис. 20 и 21 видно, что изображенные на них конструкции почти полностью идентичны. Они совпадают во всех деталях с единственным маленьким исключением — заслонка на рис. 21 повернута на 90° относительно положения заслонки, изображенного на рис. 20. Посмотрим, к чему же приведет столь незначительное, на первый взгляд, изменение. Предположим вначале, точно так же, как мы это делали в предыдущем случае, что скорость вала остается постоянной. Грузы также занимают постоянное положение относительно вала, заслонка неподвижна и, следовательно, как и в предыдущем случае, наличие регулятора пока не сказывается на работе системы. Казалось бы, ничто не изменилось. Но не будем торопиться с выводами.

Пусть, как и в предыдущем случае, по какой-то причине скорость вращения вала слегка увеличивается. Грузы расходятся в стороны, конец рычага поднимается и это влечет за собой открывание заслонки. Но при открывании заслонки количество подаваемого пара увеличивается. Это влечет за собой еще большее повышение скорости, грузы расходятся еще дальше — заслонка открывается еще боль-

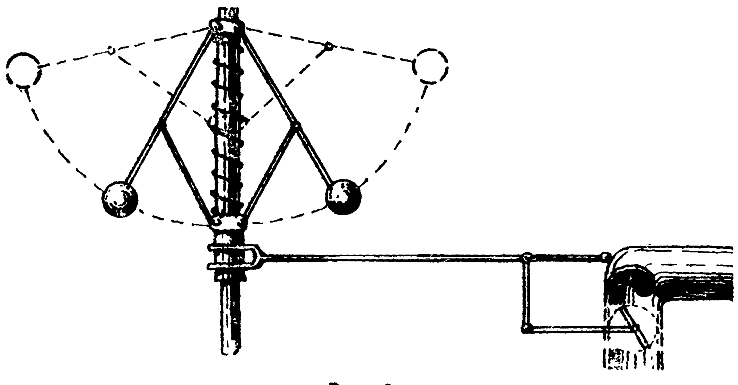


Рис. 21.

ше. Как говорят, машина пошла вразнос. Процесс увеличения скорости закончится только тогда, когда рычаги с грузами займут горизонтальное положение.

Наоборот, если скорость вращения вала по какой-либо причине слегка уменьшается, это влечет за собой закрывание заслонки, а следовательно, уменьшение подачи пара. Процесс будет продолжаться вплоть до полной остановки машины.

Легко заметить, что обратная связь в данном случае положительна, т. е. работа регулятора не противодействует, а напротив, способствует причине, вызвавшей первоначальное отклонение. Из проведенного выше анализа видно, что положительная обратная связь действует во всех отношениях противоположно отрицательной обратной связи. Она отнюдь не способствует сохранению значения регулируемого параметра постоянным. В системе с положительной обратной связью регулируемый параметр может сохранять предписанное ему значение только до тех пор, пока полностью отсутствуют причины, вызывающие его малейшее отклонение. Но так не бывает, причина всегда найдется. Поэтому мы сделаем окончательное заключение: в системе с положительной обратной связью регулируемый параметр может принимать только некоторое граничное значение. В рассмотренной системе такими граничными значениями оказываются либо нулевая, либо максимально возможная скорость. Хорошо еще, что действие регулятора прекращается, когда рычаги с грузами занимают горизонтальное положение. В противном случае скорость увеличивалась бы безгранично, а это неизбежно привело бы к катастрофе, что, кстати, случается на практике.

Таким образом, изменяя знак обратной связи, а это, как мы наблюдали, очень просто сделать, во всяком случае в регуляторе Уатта, мы получаем два противоположных эффекта. Отрицательная обратная связь стремится удержать регулируемый параметр как можно более близким к заданному значению, т. е. стабилизирует систему, а положительная обратная связь, напротив, делает систему еще более чувствительной к малейшим отклонениям. В третьей главе мы с успехом использовали положительную обратную связь именно с целью увеличения чувствительности системы к отклонениям или, как мы тогда говорили, с целью увеличения коэффициента усиления. В этой главе мы рассматриваем только отрицательную обратную связь, свойства которой далеко не исчерпываются сказанным выше.

Конструкция регулятора Уатта, показанная на рис 20, общеизвестна, более того, описание регулятора мы заимствовали из учебника физики для средней школы[1], сделав его лишь чуть более пространным. В учебнике, в частности, говорится следующее: «Всякое изменение числа оборотов вала машины влечет за собой изменение количества пара, поступающего в цилиндр машины. Благодаря этому вал машины вращается с постоянным числом оборотов.»

Посмотрим, так ли уж справедливо последнее утверждение. Выясним сначала, что необходимо для постоянства скорости вращения вала паровой машины. Мы все время молчаливо предполагали, что паровая машина действует не вхолостую, а выполняет полезную работу. Иными словами, определенное количество энергии передается от паровой машины в нагрузку. Количество энергии, отдаваемое

---

[1] А. В. Перышкин, Курс физики, часть вторая изд 15-е, М, «Просвещение», 1968

в нагрузку в единицу времени, прямо пропорционально скорости вращения вала.

В паровую машину энергия поступает вместе с нагретым паром. Часть энергии рассеивается в виде тепловых потерь, а часть преобразуется в механическую энергию и передается в нагрузку. Количество энергии, поступающей в паровую машину в единицу времени, прямо пропорционально количеству пара, также поступающего в единицу времени, конечно, при условии, что давление пара и его температура остаются постоянными. Последнее условие мы будем считать всегда выполненным.

Количество пара, поступающего в паровую машину, целиком определяется положением заслонки. Следовательно, если заслонка неподвижна, а давление и температура пара постоянны, то положение заслонки однозначно определяет количество энергии, поступающей в паровую машину в единицу времени. Если при этом и нагрузка не меняется, то за единицу времени в ней расходуется постоянное количество энергии и на тепловые потери расходуется постоянное количество энергии, причем сумма израсходованной энергии всегда в точности равна количеству поступившей энергии. Говорят, что система находится в состоянии равновесия. Состояние равновесия, в частности, определяет постоянство скорости вращения вала. Таким образом, мы снова, на этот раз из энергетических соображений, приходим к тому же самому выводу, что если положение заслонки не изменяется и нагрузка паровой машины постоянна, то скорость также остается постоянной и для этого не требуется никакой обратной связи.

Предположим теперь, как мы это делали выше, что нагрузка паровой машины уменьшилась, потому что, например, отключилась часть потребителей. Количество энергии, расходуемой в нагрузке в единицу времени, уменьшилось, но количество энергии, поступающей в паровую машину, остается тем же самым. Равновесие нарушилось, и скорость вращения вала неизбежно должна увеличиться, что и происходит на самом деле. Единственная возможность установить прежнее значение скорости вращения вала состоит в том, чтобы уменьшить количество поступающей энергии, т. е. изменить положение заслонки. Это и делает регулятор Уатта.

Но положение заслонки в регуляторе Уатта в свою очередь определяется скоростью вращения вала, и изменить положение заслонки можно, лишь изменив скорость вала. Отсюда очевидный вывод: регулятор Уатта не дает возможности установить прежнее значение скорости после изменения нагрузки. Новое состояние равновесия может быть достигнуто только при другом значении скорости, так как процесс регулирования неизбежно связан с изменением положения заслонки.

Запишем теперь все сказанное в виде уравнения. Обозначим через α угол поворота заслонки и через P количество энергии, потребляемой в нагрузке в единицу времени. Согласно всему сказанному выше скорость вращения вала машины (обозначим ее буквой v) будет тем больше, чем шире открыта заслонка и чем меньше энергии потребляет нагрузка. Иными словами:

$$v = k_1 \alpha - k_2 P,$$

где k_1 и k_2 — постоянные коэффициенты.

Если угол поворота заслонки α постоянен, то скорость вращения вала v однозначно определяется величиной нагрузки. Так и происходит в машине, лишенной регулятора Уатта.

Введем теперь регулятор, т. е. предлоположим, что

$$\alpha = \alpha_0 - k_3 v,$$

где k_3 — постоянный коэффициент, зависящий, вообще говоря, от отношения плеч рычага, передающего движение от датчика к заслонке на рис. 20. Знак минус указывает на то, что обратная связь отрицательна.

Решая два выведенных выше уравнения совместно, получим:

$$v = \frac{k_1 \alpha_0 - k_2 P}{1 + k_1 k_3}.$$

Эта формула еще раз подтверждает сказанное. Наличие регулятора Уатта не делает величину скорости независимой от величины нагрузки, а лишь уменьшает эту зависимость в $(1+k_1k_3)$ раз. Точно к такому же выводу мы пришли бы, если бы предположили, что нагрузка постоянна, а изменяется, например, температура пара, его давление или какой-либо другой параметр системы.

Постоянные коэффициенты k_1 и k_2 целиком определяются конструкцией паровой машины, причем коэффициент k_1 есть не что иное, как коэффициент усиления, поскольку сама машина представляет собой усилитель. Коэффициент k_3, напротив, полностью определяется конструкцией регулятора.

Попробуем использовать это обстоятельство для усовершенствования регулятора Уатта и рассмотрим конструкцию, показанную на рис. 22. Эта конструкция снова почти полностью совпадает с предыдущей. Единственное отличие заключается в конструкции рычага. Ясно, что чем больше длина плеча AB, тем больше величина коэффициента k_3. Рассуждая иначе — чем больше длина плеча AB, тем меньше должно изменяться положение грузов для достижения того

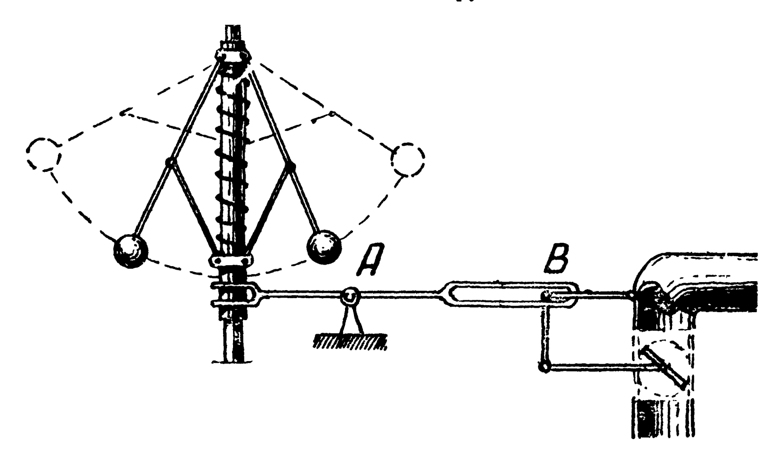


Рис. 22.

же самого изменения положения заслонки; чем больше длина плеча AB, тем меньше зависимость скорости вращения вала от величины нагрузки Однако чем больше длина плеча AB, тем большее усилие нужно приложить, для того чтобы переместить рычаг. Рычаг вместе с заслонкой, как и всякая механическая система, неизменно содержит трущиеся части, и для перемещения рычага необходимо преодолеть силу трения.

Таким образом, кроме тех сил, которые мы до сих пор рассматривали, изучая работу регулятора Уатта: центробежной силы, силы веса и силы давления пружины, необходимо учитывать еще силу трения, которая тем больше, чем больше длина рычага AB, т. е. чем больше коэффициент k_3. Эта дополнительная сила также приведет к изменению положения груза и в конечном итоге — к изменению скорости вращения вала. Следовательно, предложенная нами новая конструкция регулятора Уатта позволяет уменьшить зависимость скорости от нагрузки лишь до определенных пределов, т. е. до тех пор, пока величина силы трения не станет сравнимой с другими силами, определяющими положение грузов.

Правда, и из этого положения есть выход. Для того чтобы уменьшить трение, можно смазать части регулятора ... мылом? Ну, раз уж речь идет о паровой машине, давайте вместо мыла воспользуемся машинным маслом, заметив, однако, что мыло, незаслуженно забытое в предыдущей главе, снова заняло достойное место на страницах нашего повествования.

Обобщим теперь все сказанное нами. Прежде всего для правильного понимания принципа действия отрицательной обратной связи нам понадобилось ввести два новых чрезвычайно важных понятия. Это, во-первых, понятие программы, или плана, работы системы и, во-вторых, понятие влияния внешней среды, которое в нашем случае сводилось к изменению нагрузки.

Заменим теперь, как мы это с успехом делали в предыдущих главах, отдельные части паровой машины черными ящиками. В результате получается схема, показанная на рис. 23. Паровую машину вместе с пароподводящей трубой и заслонкой мы заменили черным ящиком, обозначенным буковой *У* (усилитель). Входной величиной этого ящика является угол поворота заслонки α, а выходной — скорость движения поршня u. Исполнительный механизм мы тоже заменили черным ящиком, обозначенным буквой *И*. На входе этого черного ящика действует уже отмеченная величина u, а на выходе — скорость вращения вала v. Нагрузку мы изображаем в виде черного ящика, обозначенного буквой *Н*. Этот ящик не имеет выхода. Иными словами, мы предполагаем, что вся энергия, подводимая к нагрузке, целиком расходуется ею самою. Это предположение в общем случае, конечно, неверно, но нас интересует не столько сама нагрузка, сколько ее возможные изменения. Кроме того, в понятии «нагрузка» мы как бы обобщаем все внешние силы, действующие на систему. Величина скорости вращения вала по цепи обратной связи, обозначенной буквами *ОС*, передается на вход системы и с помощью датчика, обозначенного буквой *Д*, сравнивается (измеряется) с некоторой величиной, представляющей собой план, или программу работы системы. Эту величину мы обозначили буквой α_0.

На выходе датчика образуется величина, пропорциональная разности между истинным и заданным значениями скорости. Эта величина по линии связи передается на вход усилителя, причем она численно равна углу поворота заслонки α.

До сих пор мы все время считали, что план работы паровой машины состоит в том, чтобы поддерживать скорость постоянной, поэтому величину α_0 мы тоже считали постоянной. Однако легко сообразить, что все сказанное выше остается справедливым, если скорость не остается постоянной, а должна изменяться со временем по какому-либо закону. Меняя вес или расположение грузов в регуляторе Уатта, мы легко достигнем такого изменения скорости.

Теперь самое главное. Работа системы на рис. 23 подчиняется законам, которые мы сформулировали выше как словесно, так и в виде уравнения, независимо от того, что на самом деле представляют собой ее главные составные части, т. е. усилитель, исполнительный механизм, датчик и линия связи. Так, роль усилителя вместо паровой машины может играть электронный, пневматический, гидравлический усилитель или же, наконец, описанный нами кабестан. То же самое относится и к исполнительному механизму, роль которого может, в частности, выполнять механическое приспособление для игры на рояле, и к остальным частям схемы. От каждого из черных ящиков требуется единственно, чтобы их работа подчинялась одним и тем же законам, т. е., например, чтобы величина выхода оказывалась пропорциональной величине входа В предыдущих главах мы потратили довольно много усилий, демонстрируя то обстоятельство, что подобные условия удовлетворяются для чрезвычайно широкого ряда различных искусственных и естественных систем.

Сделаем еще одно замечание. Читатель, наверное, давно уже заметил странное пристрастие авторов к ловушкам для мамонтов, кабестанам, паровым машинам и тому подобным древностям. Уместно ли уделять так много внимания паровой машине на страницах книги, посвященной одной из самых молодых наук — кибернетике? На наш взгляд, уместно. Гораздо проще представить себе движение заслонки в трубе, подводящей пар, чем тончайшие молекулярные процессы, происходящие в кристалле транзистора или мышце живого организма. Еще одно обстоятельство — машина Ньюкомена даже после того, как Генри Поттер соединил веревкой кран с коромыслом, не стала предметом изучения науки кибернетики, хотя бы по той причине, что сама кибернетика появилась через 250 лет после описанных в этой книге событий. Более того, сейчас, как и 250 лет тому назад, паровые машины с регуляторами и без регуляторов изучаются в рамках науки термодинамики, а их использование относится к области техники, называемой энергетикой.

Кибернетика изучает только те процессы, а именно процессы управления, которые являются общими и для паровых машин, и для ло-

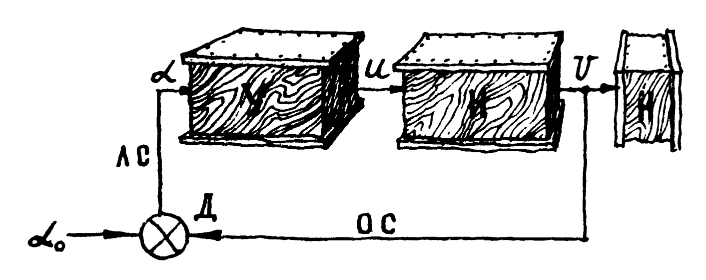


Рис. 23.

вушек для мамонтов, и для живых организмов, и для сверхсовременных автоматических устройств. Назначение кибернетики в том и состоит, чтобы, изучив закономерности процессов на достаточно простом и доступном примере, использовать затем полученные знания при конструировании более сложных и тонких систем. Подобный прием называется моделированием и составляет одну из главных методологических основ современной кибернетики. О моделировании и моделях речь пойдет еще впереди, а пока мы ограничимся лишь тем, что назовем систему, показанную на рис. 23, моделью регулятора Уатта. Эта система в равной степени может служить моделью любого другого физического устройства, состоящего из изображенных на рис. 23 частей, охваченных цепью отрицательной обратной связи.

Система на рис. 23 получила название системы автоматического регулирования или, короче, П-регулятора. Буква П означает, что в системе осуществляется *пропорциональное* регулирование, а это в свою очередь значит, что управляющее воздействие α пропорционально разности между фактическим значением регулируемого параметра v и его заданным значением α_0. Свойства П-регулятора вкратце таковы:

1) пока внешние воздействия не влияют на работу системы (нагрузка постоянна), значение регулируемого параметра v в точности равно заданному и наличие обратной связи никак не влияет на работу системы;

2) наличие цепи отрицательной обратной связи уменьшает зависимость регулируемого параметра от внешних воздействий (изменение нагрузки) в $(1+k_1k_3)$ раз;

3) подобное уменьшение не может быть безграничным хотя бы из-за присущих любой физической системе трения и аналогичных ему явлений. Ниже мы увидим, что существуют и другие ограничения на величину k_1k_3.

Такие П-регуляторы часто встречаются в живых организмах. Например, лягушка, охотясь за комаром, определяет расстояние до него на глаз (разность между фактическим и желаемым положениями) и затем, прыгая, делает так, чтобы мускульные усилия при прыжке оказались пропорциональными величине расстояния.

Модель, показанная на рис. 23, в равной степени применима и к пианисту. Роль усилителя играют в данном случае мускулы предплечий и кистей рук, роль исполнительного механизма — сложная система, включающая в свой состав пальцы, клавиши и рычаги, передающие движение клавиш молоточкам. Воздействие внешней среды состоит в том, что пальцы устают, а рычаги клавиш обязательно имеют люфты и, кроме того, изнашиваются со временем. Датчиком служат уши пианиста, причем услышанный им звук (регулируемый параметр) сравнивается с планом Результат сравнения определяет сигналы, посылаемые по нервной системе (линия связи) к мышцам пальцев. Но есть здесь и существенное различие. В отличие от паровой машины план в данном случае не задается извне, а хранится в голове пианиста, если, конечно, это талантливый пианист. Игра бездарного исполнителя, слепо следующего лишь тому, что написано в нотах (план, задаваемый извне), мало чем отличается от игры механического приспособления.

Модель системы автоматического регулирования позволяет провести и гораздо более далеко идущие аналогии Но остается один вопрос: неужели нельзя все же сделать так, чтобы регулируемый параметр оказался полностью независимым от внешних условий?

Или, другими словами, нельзя ли построить такой регулятор, который поддерживал бы скорость вращения паровой машины в точности, а не приближенно постоянной? Чтобы ответить на этот вопрос, попробуем внести в регулятор Уатта еще одно усовершенствование. Рассмотрим систему, изображенную на рис. 24. Многие детали этой системы нам уже хорошо знакомы, но появилось здесь и нечто новое. Новой деталью является цилиндр с поршнем и золотником, к слову сказать, в точности такой же, как и цилиндр самой паровой машины. Шток поршня связан с заслонкой, а шток золотника — с центробежным регулятором. Питается этот цилиндр от того же котла, что и сама машина. Посмотрим, как работает подобная система.

Пока скорость вращения вала остается равной заданному значению, золотник располагается в среднем положении. Пар с одинаковой силой давит с обеих сторон поршня, и поршень, а следовательно, и заслонка остаются неподвижными. Снова, пока нет отклонения регулируемого параметра, регулятор не оказывает никакого воздействия на работу системы. Предположим, что скорость вращения несколько увеличивается. Грузы расходятся в стороны, золотник пе-

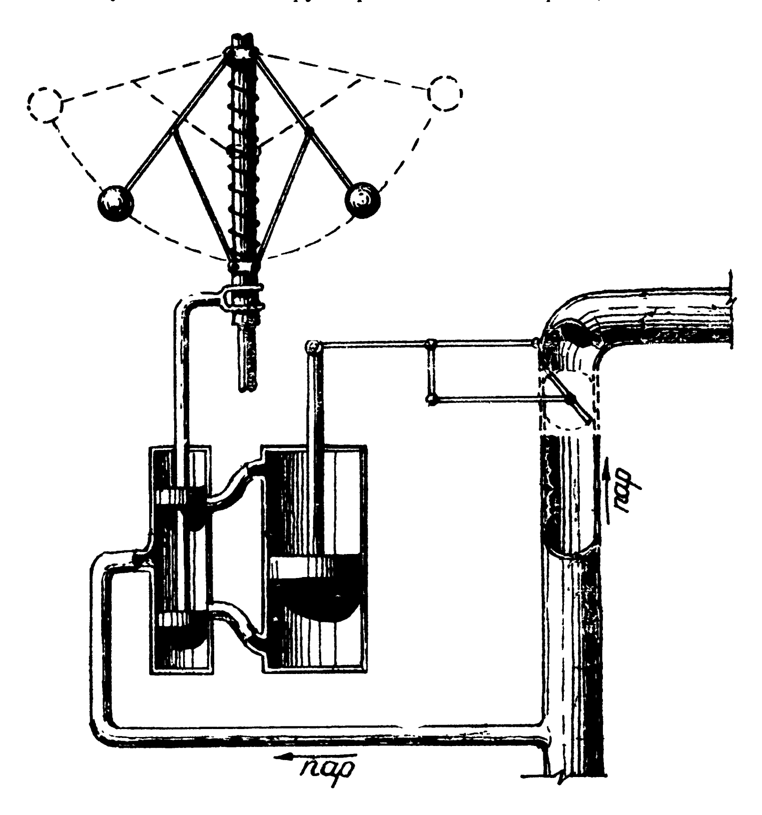


Рис. 24.

ремещается вверх и пар поступает теперь лишь с одной стороны цилиндра. Ясно, что в такой ситуации поршень приходит в движение и движется вниз до тех пор, пока давление пара с обеих его сторон снова не становится одинаковым. Такое положение наступает лишь тогда, когда золотник принимает свое прежнее положение, а это возможно только при достижении прежнего значения скорости. Значит, в нашей новой системе после изменения нагрузки (мы по-прежнему считаем, что именно изменение нагрузки было причиной изменения скорости) равновесие наступает при другом положении заслонки, но при прежнем значении скорости.

Попробуем представить себе теперь закон функционирования черного ящика, который мог бы служить моделью только что описанного цилиндра с поршнем. Достаточно очевидно, что входом такого черного ящика должно служить перемещение золотника (обозначим его буквой x), а выходом — перемещение поршня y. Пока золотник находится точно в среднем положении (обозначим это положение золотника буквой x_0), поршень неподвижен. Весьма существенно здесь то, что само положение поршня совершенно безразлично. Он может находиться при этом в любой части цилиндра (начальное положение поршня обозначим буквой y_0). Пусть теперь золотник смещается, например, вверх и занимает новое положение, соответствующее перемещению золотника, равному x_1. Поршень приходит в движение, однако величина, на которую перемещается поршень, в дальнейшем уже не зависит от положения золотника. Когда золотник занимает положение, соответствующее перемещению штока x_1, поршень движется с постоянной скоростью, пока не упрется в стенку цилиндра. Предположим, что цилиндр достаточно длинен и поршень никогда не доходит до своих крайних положений. А вот скорость движения поршня, очевидно, будет зависеть от положения золотника. Чем больше перемещение x_1, тем в большей степени открыто отверстие золотника, тем больше пара поступает в цилиндр, тем выше скорость поршня.

Из сказанного следует, что черный ящик, моделирующий поведение цилиндра с поршнем и золотником, обладает следующими свойствами: а) выходная величина в каждый момент времени практически не зависит от входной величины, точнее, она определяется всей историей изменения входной величины, начиная с некоторого «нулевого» момента времени; б) скорость изменения выходной величины прямо пропорциональна входной величине. Но если нам известна скорость изменения некоторой величины и значение ее в начальный момент времени, то мы можем определить значение этой величины в любой момент времени с помощью интегрирования. Это дает нам возможность написать

$$y = y_0 + k_4 \int_0^t \frac{dy}{dt}\, dt = y_0 + k_4 \int_0^t x_1\, dt,$$

где k_4 — снова постоянный коэффициент.

Тот, кто не любит интегралов, может разобраться в работе механизма на основании приведенного выше словесного объяснения. Мы упомянули интеграл лишь для того, чтобы сказать, что черный ящик, моделирующий работу цилиндра с поршнем и золотником, а также многих других подобных им механизмов, получил название *интегрирующего звена.*

Составим теперь полную модель всей системы, изображенной на рис. 24. Она выглядит так, как показано на рис. 25. Новым по сравнению с рис. 23 является лишь наличие интегрирующего звена *Ин*. Система подобного типа получила название И-регулятора, причем объяснять, откуда взялась в этом названии буква И, уже нет надобности. Этот И-регулятор в отличие от П-регулятора может заставить регулируемый параметр в точности следовать заданному плану изменений.

Но зачем было рассматривать П-регуляторы со всеми их недостатками, если известно, как эти недостатки устранить, неужели все дело только в непонятном пристрастии авторов к древностям? Ответ на этот вопрос приводит нас к рассмотрению нового понятия — понятия устойчивости. Посмотрим еще раз внимательно на регулятор Уатта в его «первозданном» виде, т. е. на рис. 20. Не встретит ли здесь читатель еще кого-нибудь из своих старых знакомых, хотя, может быть, и не упомянутых еще на страницах этой книги? Конечно, да. Ведь груз, укрепленный на рычаге, способном свободно качаться на шарнире, — это обыкновенный маятник. Правда, маятник несколько своеобразный, поскольку в данном случае кроме силы веса на него действует еще и центробежная сила, и поэтому в состоянии равновесия рычаг несколько отклонен от вертикали. Однако он сохраняет все свойства маятника. В частности, испытав толчок, он начинает совершать колебания относительно положения равновесия. Благодаря наличию сил трения колебания будут постепенно затухать, как и в обычном маятнике.

Посмотрим, что произойдет, если мы подтолкнем грузы регулятора Уатта, например, вниз. Как было сказано выше, это приведет к открыванию заслонки и увеличению подачи пара. Увеличение подачи пара вызовет увеличение скорости вращения вала паровой машины, и, таким образом, сила, стремящаяся вернуть маятник в положение равновесия (в нашем случае это центробежная сила), увеличится. Когда маятник перейдет в положение равновесия и качнется в противоположную сторону, заслонка закроется и скорость вращения вала уменьшится. Это снова приведет к увеличению силы, стремящейся вернуть маятник в положение равновесия.

Сказанное как будто свидетельствует о том, что колебания рычага регулятора Уатта под воздействием отрицательной обратной связи должны затухать быстрее, чем при отсутствии такой связи,

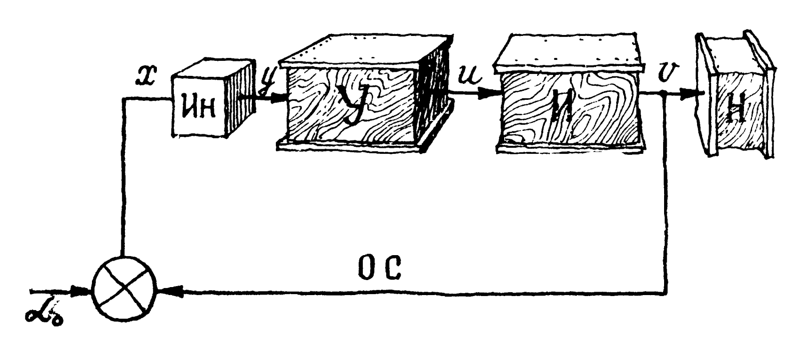


Рис. 25.

поскольку каждый раз возникает дополнительная сила, стремящаяся вернуть рычаг в положение равновесия. Действительно, одно из свойств отрицательной обратной связи состоит в том, что она всегда стремится успокоить (стабилизировать) всякие непроизвольные движения, возникшие в системе. Но в данном конкретном случае не будем торопиться с выводами. Вспомним, что у паровой машины имеется еще и маховик.

Всем известно, что вал с маховиком не может изменить свою скорость мгновенно даже под воздействием достаточно больших усилий. Собственно, маховик в паровой машине для того и нужен, чтобы скорость вращения вала оставалась постоянной в те моменты, когда поршень находится в крайних положениях и усилия, воздействующие на кривошип, отсутствуют. Поэтому на увеличение скорости вращения вала после дополнительного открывания заслонки требуется определенное время. Предположим, что в рассматриваемом случае это время в точности равно половине периода колебаний рычага регулятора, т. е. времени, в течение которого груз переходит из одного крайнего положения в другое. Посмотрим, что тогда произойдет. Пусть мы снова отклонили грузы регулятора вниз от положения равновесия. Заслонка открылась, пар стал поступать в машину более интенсивно и создались условия для увеличения скорости вращения вала. Но вал с маховиком раскручивается медленно и скорость достигает своего нового значения как раз к тому моменту, когда грузы регулятора уже переходят положение равновесия и оказываются в противоположном крайнем положении. Возросшая в результате увеличения скорости центробежная сила стремится не вернуть грузы в положение равновесия, а, наоборот, отклонить их еще дальше. Дальнейшее отклонение грузов сопровождается все большим закрыванием заслонки — создаются условия для уменьшения скорости. И скорость действительно начинает уменьшаться, однако опять не сразу. Минимального значения скорость достигает как раз тогда, когда грузы регулятора снова минуют положение равновесия и приходят в крайнее нижнее положение. Малое значение скорости вращения вала опять-таки приводит к тому, что уменьшение центробежной силы как бы поощряет колебания рычагов с грузами.

Следовательно, наличие в системе маховика приводит к тому, что возникают силы, не препятствующие, а способствующие колебаниям рычагов с грузами. Если эти силы достаточно велики, а в конечном итоге, как это нетрудно сообразить, величина их определяется коэффициентом k_1, то однажды начавшись, колебания рычагов с грузами не только не затухнут, а напротив, размах их будет все более и более увеличиваться. В такт с колебаниями регулятора изменяется и скорость вращения вала, что, конечно, совершенно недопустимо.

Один из важных выводов, который мы можем сейчас сделать, следующий. Если П-регулятор, показанный на рис. 23, содержит инерционные элементы, подобные маховику (а такие элементы присутствуют во всех без исключения физических системах), то устойчивая работа возможна лишь до определенных значений коэффициента k_1. Стоит превысить это значение, и в системе возникают колебания, подобные описанным выше. Это и есть то дополнительное ограничение на величину произведения k_1k_3, о котором мы говорили ранее на стр. 71.

Еще хуже обстоит дело в И-регуляторе, изображенном на рис. 25. Вспомним, что закон функционирования интегрирующего звена гла-

сит, что на изменение выходной величины интегрирующего звена (перемещение поршня в цилиндре) требуется определенное время. Достаточно этому времени хотя бы приблизительно совпасть с половиной периода колебаний рычагов регулятора, как возникает уже описанная картина нарастающих колебаний, на этот раз уже без всякого участия маховика. Наличие маховика лишь усугубляет эффект. По этой причине И-регуляторы оказываются устойчивыми лишь в весьма узком диапазоне допустимых изменений параметров и поэтому практически не используются.

Снова возникает вопрос: какой смысл описывать систему, которая никогда не используется на практике? Ответ достаточно прост. Мы знаем секрет, как исправить положение.

Рассмотрим маховик, точнее, не весь маховик, а лишь небольшую часть его обода. Предположим, что в этом ободе проделано небольшое углубление и в этом углублении покоится грузик, растянутый двумя пружинками, как показано на рис. 26. Пока скорость вращения маховика остается постоянной, иными словами, пока маховик не испытывает ускорений, грузик неподвижен относительно маховика и расположен точно посередине углубления. Стоит только скорости хоть немного изменить свое значение, как грузик немедленно переместится. При ускорении он перемещается в направлении, противоположном направлению вращения маховика, а при замедлении — в том же направлении, в каком вращается маховик. Величина отклонения грузика пропорциональна величине ускорения, как это следует из первого закона Ньютона.

Посмотрим, что произойдет, если мы сделаем отклонение заслонки регулятора Уатта пропорциональным отклонению грузика. Вопрос о том, как передать перемещение грузика к заслонке, оставим в стороне. Это можно сделать, например, точно так же, как во второй главе мы преобразовывали перемещение поплавка в бензобаке в перемещение стрелки указателя на приборной доске. Важно другое, теперь заслонка будет отклонена не тогда, когда уже изменилась скорость, а как только создадутся условия для изменения скорости, т. е. когда возникнет ускорение. Повторив рассуждения, проведенные выше, читатель легко убедится, что подобная система стремится подавлять колебания рычага с грузом так же, как тогда, когда мы еще не рассматривали влияния маховика.

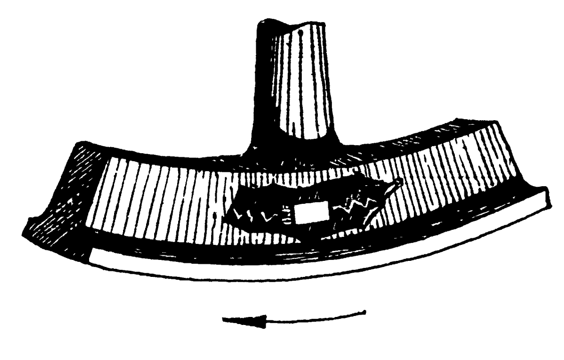


Рис. 26.

Черный ящик, моделирующий поведение грузика, расположенного в ободе маховика, работает следующим образом. Его выходной величиной является перемещение (грузика), а входной — ускорение маховика, т. е. скорость изменения скорости вращения или, в более общем случае, скорость изменения регулируемого параметра. Но скорость изменения величины есть производная этой величины по времени. Следовательно, наш новый черный ящик обладает тем свойством, что его выходная величина пропорциональна производной от входной величины по времени. В формульной записи это выглядит так:

$$w = k_5 \frac{dv}{dt},$$

где k_5 — постоянный коэффициент.

Этот черный ящик получил название дифференцирующего звена.

Рассмотрим систему, показанную на рис. 27. Она получила название Д-регулятора, который всегда устойчив, во всяком случае, в том смысле, что в нем не возникают колебания регулируемого параметра. Но, к сожалению, он к тому же совершенно неработоспособен. Действительно, управляющее воздействие на вход усилителя подается только тогда, когда регулируемый параметр изменяется. Если же регулируемый параметр имеет постоянное значение, регулирующее воздействие на выходе Д-звена полностью отсутствует и, следовательно, система работает так, как если бы у нее вообще не было никакого регулятора.

Мы рассмотрели три различных типа регуляторов. Первый из них, П-регулятор, обладает, как говорят, неустранимой систематической погрешностью. Иными словами, регулируемый параметр в нем в каждый момент времени может безнаказанно отклоняться от заданного значения на определенную величину, называемую также статизмом регулятора. Попытки уменьшить эту величину за счет увеличения коэффициента усиления, как мы теперь знаем, приводят к возникновению колебаний.

В И-регуляторе отсутствует систематическая погрешность (статизм), но зато во всех случаях, представляющих практический интерес, он оказывается принципиально неустойчивым.

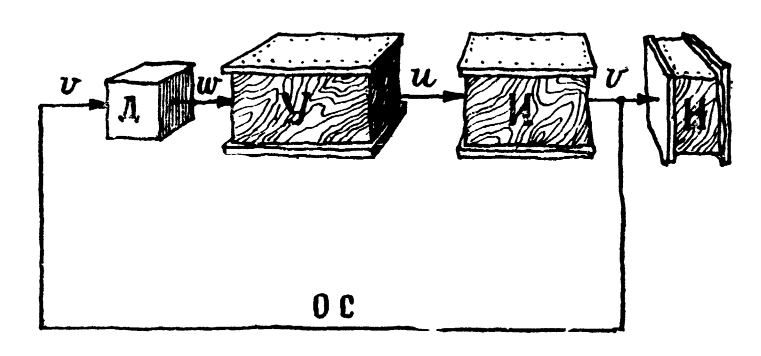


Рис. 27.

Наконец, Д-регулятор представляет собой полную противоположность И-регулятору. Он всегда устойчив, но зато отклонение регулируемого параметра от заданной величины может достигать здесь тех же самых значений, каких оно достигало бы при отсутствии всякого регулятора.

Где же выход из создавшегося положения? Ну, конечно же, нужно объединить принципы действия трех регуляторов в одной конструкции. В результате мы приходим к системе, изображенной на рис. 28. Величина, пропорциональная разности между заданным значением (планом) и фактическим значением регулируемого параметра, поступает на вход интегрирующего звена. Выходные величины интегрирующего и дифференцирующего звеньев складываются с самой величиной разности, и полученная таким образом сумма трех величин поступает на вход усилителя. Подобная система получила название ПИД-регулятора.

В ПИД-регуляторе главную роль играет та часть суммы величин, поступающих на вход усилителя, которая пропорциональна отклонению. Иными словами, в основном ПИД-регулятор работает как П-регулятор. Выходной сигнал интегрирующего звена относительно мал. Он используется только для того, чтобы «выбирать» ошибку, оставшуюся после того, как П-регулятор закончил свою работу. Наконец, выходной сигнал дифференцирующего звена возникает лишь в моменты изменения регулируемого параметра и служит для того, чтобы гасить возникающие колебания.

К сожалению, не одни только маховики обладают инерцией — не чуждо это свойство и человеческому мышлению. Поэтому чтобы дать читателю время «переварить» все сведения, полученные в этой главе, приглашаем его на небольшую загородную прогулку. Вы сидите за рулем автомобиля, мчащегося по прямому, как стрела, шоссе. Но вот автомобиль слегка отклонился вправо от намеченного вами курса и оказался в опасной близости от обочины. Не медля ни секунды, вы поворачиваете руль влево и держите его в таком положении до тех пор, пока не достигнуто исходное положение. Теперь надо повернуть руль в исходное положение, но ведь на это требуется вре-

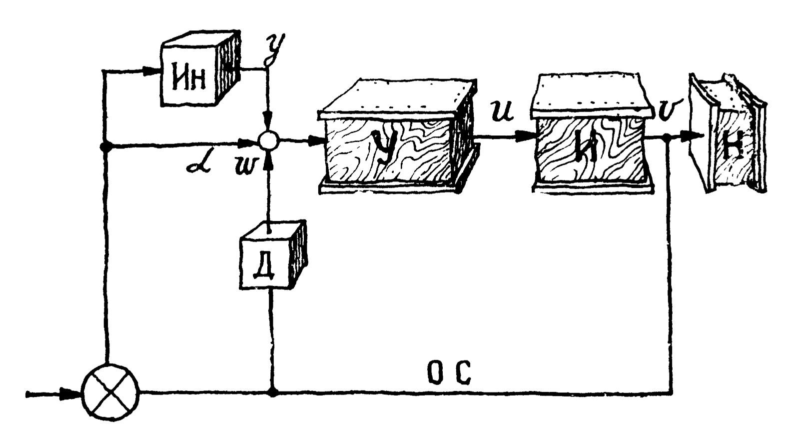


Рис. 28.

мя, и пока вы крутите баранку, автомобиль заметно отклоняется влево. Вы продолжаете крутить баранку вправо и, лишь достигнув намеченной для себя невидимой линии курса, начинаете возвращать ее в положение «прямо». Но на это опять требуется время, и снова заметное отклонение автомобиля вправо

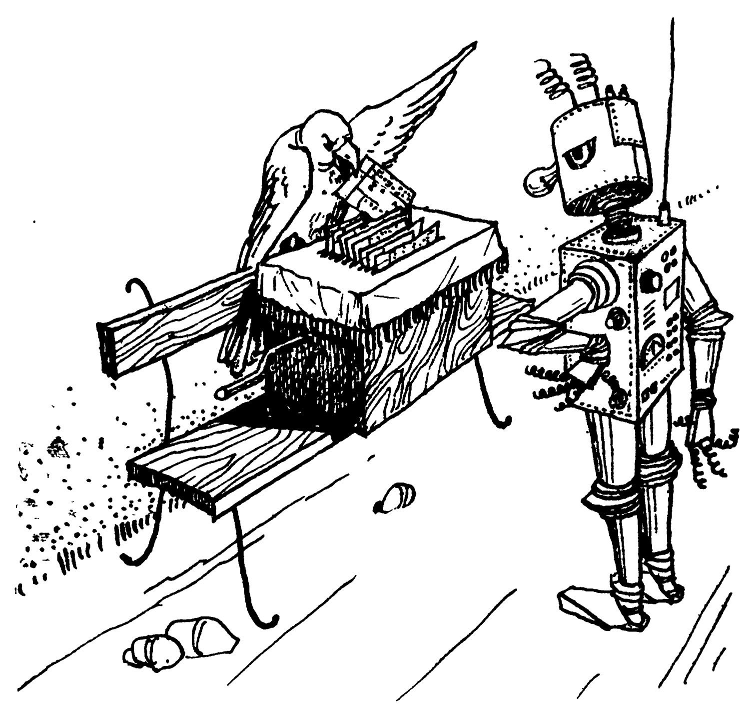
Не надо слишком сильно нажимать на акселератор, иначе подобный эксперимент может закончиться очень и очень плохо. Но даже и на малой скорости автомобиль выписывает на шоссе хорошо знакомую всем начинающим автоводителям синусоиду. Опытный шофер никогда не поступает так, как было только что описано Он начинает возвращать баранку в исходное положение задолго до того, как автомобиль достигнет намеченной линии курса. Умение определить момент, когда начать поворачивать баранку, приходит вместе с опытом Приходит с опытом и другое — у шофера-профессионала скорость, с которой он вращает баранку, пропорциональна отклонению автомобиля от линии курса.

Отсюда поразительный вывод — человек, впервые севший за руль, ведет себя, как И-регулятор. Это совершенно естественно, в своем повседневном опыте он имеет дело в подавляющем большинстве с неподвижными объектами и привык перемещать объект, например, когда ставит чашку на блюдце, до тех пор, пока этот объект не займет в точности предназначенного ему положения

Садясь за руль автомобиля, человек становится звеном более сложной системы. Он видит положение автомобиля и осуществляет регулирующее воздействие, вращая баранку. Но затем вступают в действие усилитель (двигатель автомобиля) и колеса (исполнительный механизм). Обучаясь вождению автомобиля, человек как бы «выращивает» в себе пропорциональное и дифференцирующее звенья и благодаря этому приобретает свойства ПИД-регулятора.

Интересно, что способности человека быть регулятором могут оказаться нарушенными в результате различных болезней или просто усталости. Дрожание рук — суть не что иное, как колебание, возникающие в результате плохого регулирования. Это обстоятельство было подмечено еще Норбертом Винером.

Однако мы уже поговорили об автомобилях и, следовательно, пора заканчивать эту и без того затянувшуюся главу.



Молодой кавалер проигрался в Монте Карло. Верный выигрыш или смерть — только два события могли спасти его от позора. Размышляя о своей несчастной судьбе, он вспомнил рассказ о старой графине, доживающей свой век в Париже. Однажды в молодости она попала в столь же критическое положение и с успехом вышла из него, узнав секрет «верного» номера. Движимый отчаянием, кавалер устремился в Париж. Ночью он пробрался в спальню графини, напугав бедную старушку до полусмерти. Когда графиня пришла в себя, она увидела молодого человека, который стоял перед ней на коленях и заплетающимся языком умолял спасти его жизнь и честь, открыв тайну верного номера.

— О господи, это же так просто! — воскликнула старушка. — Три числа: шесть, девять и двенадцать, всегда были для меня исключительно счастливыми. Я родилась девятого декабря 1806 года, а на балу, когда мою голову венчала диадема с девятью крупными рубинами и двенадцатью бриллиантами, вделанными в шесть золотых колец, я затмила всех своих соперниц... Конечно, такие совпадения не могли быть случайными. Я получила прекрасное воспитание и не чужда натурфилософии, поэтому я сразу догадалась, что самым счастливым для меня числом должно быть среднее этих трех чисел. Сложив их, я получила двадцать семь, а поделив на три — восемь. Затем без малейших колебаний несколько раз подряд я поставила на восьмерку.

Также без малейших колебаний мы называем эту главу

О ПОЛЬЗЕ ДОГАДОК

(ГЛАВА ШЕСТАЯ)

перефразируя тем самым заглавие знаменитой книги Якоба Бернулли [1].

История знает не одну попытку использовать математику в азартных целях, причем многие из них мало чем отличались от ухищрений графини, не знавшей таблицы умножения. Но об этом речь впереди. А пока подведем некоторые итоги сказанному в предыдущей главе. Ознакомившись достаточно подробно с системами автоматического регулирования, мы получили возможность сформулировать несколько положений, имеющих принципиальное значение.

Мы установили, что цель управления — заставить некоторую систему совершать последовательность действий, предписанных программой, или планом. В предыдущей главе рассматривались примеры, где подобные действия сводились лишь к механическим перемещениям, хотя в одном случае конечным результатом механических перемещений были музыкальные произведения, исполняемые виртуозами. Теперь мы расширим понятие цели и будем считать действиями все, что совершает искусственная или естественная система, включая, например, последовательность ответов на задаваемые человеку вопросы. Заметим попутно, что данная книга также появилась как результат последовательности действий, каждое из которых состояло в написании очередного слова или, если угодно, буквы. Эти действия также совершались по определенному плану.

Сказанное дает нам право определить *процесс управления* как всякий процесс, ведущий к достижению цели, т. е. заставляющий систему выполнять запланированные действия. Вопрос о том, всегда ли план или программа задается системе извне или же план может представлять собой внутреннее свойство самой системы, мы пока оставим открытым.

Рассматривая швейную машину и ПИД-регулятор, мы пришли к выводу, что существуют по меньшей мере два принципиально различных способа организации процесса управления. Первый из них реализуется в швейной машине, которую мы отнесем к классу *автоматических систем разомкнутого типа*. К этому классу принадлежит большое количество разнообразнейших автоматических устройств и в том числе знаменитые ткацкие станки Жаккарда, продукция которых хорошо известна любой моднице. В разомкнутой автоматической системе каждая движущаяся деталь жестко связана с приводом (таких приводов в общем случае может быть несколько) и совершает движения, заранее определенные конструкцией системы. Результат движения никак не контролируется. Например, если в швейной машине сломается иголка или в ткацком станке порвется нитка, все детали будут продолжать двигаться до тех пор, пока человек не исправит повреждения.

В случае ПИД-регулятора также имеется жесткая программа действий. Однако в остальном организация работы принципиально иная. До тех пор пока фактические действия системы не отличаются от заданных, управление полностью отсутствует. Процесс управления проявляет себя только тогда, когда обнаруживается отклонение от

---

[1] Имеется в виду книга Якоба Бернулли «Искусство догадок», опубликованная в 1713 г. и посвященная теории вероятностей.

намеченного плана. При этом возникает то, что мы назвали выше управляющим воздействием, и управляющее воздействие всегда направлено противоположно причине, вызвавшей отклонение. Другими словами, имеется связь между результатом действий системы и той ее частью, которая побуждает систему совершать действия. Эту связь мы назвали обратной. Системы с обратной связью мы назовем *системами замкнутого типа.*

Мы установили, наконец, что в реальных физических системах между моментом, когда создаются условия для выполнения того или иного действия, и моментом совершения самого действия всегда проходит определенное время. Поэтому принцип отрицательной обратной связи был бы вообще порочным (мы бы всегда опаздывали), если бы не додумались с помощью дифференцирующего звена определять как момент времени, когда создаются условия для отклонения, так и направление этого отклонения.

Наличие двух возможных способов построения автоматических систем приводит нас к совершенно естественному, хотя и несколько наивному вопросу: какой же из способов лучше? Действительно, вряд ли у нас есть основания предъявлять какие-либо претензии к конструкции швейной машины, верно служащей человеку уже более сотни лет. Правда, автомат для игры на рояле не удовлетворяет наши эстетические запросы, но на это легко возразить, что на сегодня вообще не существует искусственной системы, замкнутой или разомкнутой, которая могла бы полностью заменить талантливого пианиста.

Признаемся сразу, что мы не собираемся отвечать здесь на этот вопрос, поскольку такого ответа попросту не существует. В определенных условиях лучшими оказываются системы разомкнутого типа, а в других условиях — замкнутого. Однако сама постановка вопроса позволит нам прийти в конечном итоге к достаточно интересным выводам.

Обратим внимание прежде всего на то, что при прочих равных условиях разомкнутая система должна быть обязательно сложнее замкнутой. А как же иначе? Ведь в разомкнутой системе все без исключения движения составляющих ее частей определяются конструкцией, т. е. являются вынужденными. В противоположность этому в замкнутой системе многие действия совершаются как бы сами по себе, а механизм управления включается лишь тогда, когда обнаруживается отклонение.

Но сложность, конечно, не такой уж большой порок. Значительно важнее другое. Чтобы дальнейшее стало более ясным, рассмотрим, например, одну из возможных конструкций механизма привода рычага, в котором закреплена иголка швейной машины (рис. 29). Положение этого механизма, изображенное на рисунке, соответствует крайнему верхнему положению иглы. В этом положении вертикальная составляющая скорости рычага равна нулю. Вал с кривошипом вращается равномерно в направлении, показанном стрелкой. В момент, когда вал повернется точно на 90° по отношению к положению, показанному на рисунке, вертикальная составляющая скорости рычага с иглой достигает максимального значения. Поскольку рычаг обладает массой, он будет и в дальнейшем стремиться сохранить эту скорость, т. е. будет стремиться отклониться от движения, предусмотренного планом. Но конструкция кривошипного механизма препятствует такому отклонению и скорость рычага начнет уменьшаться, пока не станет равной нулю в крайнем нижнем положении иглы.

Сказанное приводит нас к выводу, что конструкция механизма привода рычага предусматривает возможность отклонения и выполнена так, чтобы это отклонение никогда не могло иметь место. То же самое распространяется и на конструкцию любой системы, построенной по разомкнутому принципу.

Но вот тут-то и возникает важнейший вопрос: все ли отклонения можно предусмотреть заранее? Можно ли, например, построить швейную машину, которая представляла бы собой систему разомкнутого типа и при этом автоматически останавливалась каждый раз, когда ломается игла? Конечно, нет. Ведь для этого надо заранее хотя бы приближенно знать момент времени, когда произойдет поломка иглы, а этого не знает никто. Одна игла может сломаться через несколько минут после начала работы, а другая служит своей хозяйке многие годы. Поломка иглы — это *случайное событие*. Такими же точно случайными событиями являются, например, увеличение люфта в шарнирах рычагов, связывающих клавишу рояля с молоточком, или внезапное снижение нагрузки тепловой электростанции, причиной которому послужило то, что множество телезрителей захотели спать и одновременно выключили свои телевизоры. Именно наличие внешних воздействий, имеющих случайных характер, и вынуждает строить замкнутые автоматические системы с обратной связью.

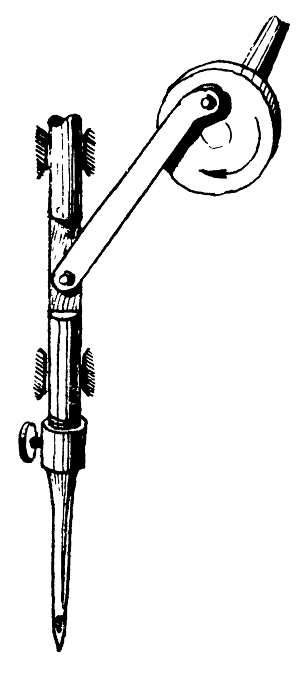


Рис. 29.

В паровой машине, снабженной регулятором Уатта, изменение положения грузов регулятора может произойти, вообще говоря, по двум различным причинам· либо вследствие случайного изменения нагрузки, либо вследствие того, что изменение скорости вращения вала предусмотрено программой работы, такое изменение в программе мы также вправе считать случайным, поскольку паровая машина, грубо говоря, не знает плана своей работы во всех деталях.

Сказанное позволяет нам рассмотреть работу обратной связи под совершенно новым углом зрения. *Автоматическая система подвержена случайным внешним воздействиям. Задача обратной связи состоит в том, чтобы в ответ на каждое такое воздействие вырабатывать свое собственное управляющее воздействие, устраняющее последствия возмущения.*

А что делает игрок, играя в азартные или неазартные игры? Какова бы ни была игра, каждый участвующий в ней имеет дело с одним или с несколькими противниками. Если бы все действия противника были в точности известны игроку наперед, игра потеряла бы всякий интерес. Смысл игры в том и состоит, что, делая ход, игрок отвечает на предыдущий ход противника, который не был ему из-

вестен или, во всяком случае, был известен не в полной мере до того, как он был совершен. Окончательный результат игры зависит от того, насколько удачными были ходы игрока.

Для пущей убедительности рассмотрим еще один пример. Пусть имеется тепловая электростанция с паровой турбиной, питающая в числе прочих потребителей некое промышленное предприятие. Величина напряжения, вырабатываемого генератором, зависит от скорости вращения вала паровой машины. Машина снабжена регулятором, который и выступает теперь, с нашей новой точки зрения, в качестве игрока. Цель такого игрока — удерживать скорость вращения вала постоянной. Если он играет плохо, то скорость, например, может понизиться, что повлечет за собой понижение напряжения и очевидным образом снизит производительность питаемого промышленного предприятия. К еще более серьезным последствиям может привести увеличение сверх определенного предела скорости вращения вала, так как чрезмерное повышение напряжения вызовет перегрев и сгорание обмоток электродвигателей. Следовательно, всякий неудачный ход игрока приводит в этом примере к убытку (проигрышу), имеющему непосредственное денежное выражение. Аналогия с азартной игрой оказывается здесь полной.

В чем же состоит искусство игрока, играющего в азартные игры? Всякий скажет — искусство это в том, чтобы предугадать ход противника и сделать собственный ход так, чтобы добиться при этом максимального выигрыша. Именно этим и занимается дифференцирующее звено ПИД-регулятора. Изменяя ускорение маховика, оно заранее предугадывает возможные изменения скорости.

Неужели простой кусочек металла, прикрепленный к маховику двумя пружинками, и заключает в себе ту великую тайну, которой тщетно добивался кавалер у старой графини? Конечно, нет. Ведь хороший игрок всегда предусматривает развитие партии на несколько ходов вперед. Что же касается дифференцирующего звена, то оно способно предсказать лишь один ближайший ход, да и то только в такой простой системе, как паровая машина. И в то же время вскрытая нами здесь аналогия оказывается чрезвычайно плодотворной.

Последовательность ходов, которые совершает игрок, называется стратегией. С любой, даже достаточно простой игрой обычно связано множество возможных стратегий для каждого игрока. В процессе игры, основываясь на сведениях об уже совершенных ходах и предугадывая следующие, игрок меняет свою стратегию, добиваясь максимального выигрыша.

Развивая обнаруженную нами аналогию, мы вправе говорить теперь и о *стратегии управления.* Стратегия ПИД-регулятора состоит в том, чтобы предугадывать один ближайший возможный ход противника и определять на основании этого свой собственный ход, который состоит в том, чтобы приоткрыть или закрыть заслонку. И дело совсем не в том, насколько эффективной оказывается такая стратегия. Мы уже установили в предыдущей главе, что ПИД-регулятор — игрок довольно слабый. Стоит ему столкнуться с достаточно изощренным противником, как он, подобно многим другим игрокам в азартные игры, начинает беспорядочно метаться из стороны в сторону, то завышая, то занижая ставки, и это неизбежно ведет к проигрышу.

И в то же время установленная нами аналогия совместно с рассмотренной в предыдущей главе идеей включения дифференцирую-

щего, а заодно и интегрирующего звеньев в цепь обратной связи открывает новое и совершенно неожиданное свойство замкнутых автоматических систем. *Оказывается, в цепь обратной связи можно включать органы, задающие стратегию управления или, если угодно, стратегию игры с природой.* А как мы вскоре увидим, и не только с природой.

Еще один пример мы посвятим также весьма азартному занятию — охоте. Как ведет себя охотник, стреляющий по летящей утке? Сначала он прицеливается, т. е. представляет себе воображаемую линию, являющуюся продолжением оси ружейного ствола. Затем, когда положение этой линии в пространстве, на его взгляд, оказывается таким, как нужно, он нажимает на собачку. Химическая энергия, заключенная в порохе, освобождается, и под действием этой энергии заряд вылетает из ствола и движется в пространстве вдоль некоторой линии, называемой траекторией. Если расчеты охотника оказались правильными, то в некоторой точке пространства и в нужный момент времени траектория заряда и траектория летящей утки пересекаются.

Однако, как это хорошо известно всем охотникам, для того чтобы выстрел оказался успешным, нужно учесть, по меньшей мере, два обстоятельства. Первое состоит в том, что заряд летит с определенной скоростью и пройдет определенное время, пока он достигнет точки пересечения траекторий. За это время утка, хотя ее скорость, конечно, значительно меньше скорости заряда, также пролетит некоторое расстояние. Поэтому всякий опытный охотник целится не в ту точку, где утка находится в данный момент, а в другую, находящуюся несколько впереди по направлению полета утки. Расстояние между положением утки в данный момент и точкой прицеливания называется упреждением. Упреждение должно быть, очевидно, тем больше, чем дальше от утки находится охотник.

Во-вторых, как известно, заряд летит в пространстве не по прямой, а по линии, называемой параболой. Поэтому, даже стреляя по неподвижной мишени, охотник должен целиться не в саму мишень, а несколько выше — давать завышение, которое опять-таки должно быть тем большим, чем дальше от цели находится охотник. Если стрельба производится не из охотничьего ружья, а из винтовки, завышения давать не нужно, поскольку оно учитывается конструкцией прицела. Тем не менее, завышение учитывается перед выстрелом путем установки прицельной рамки в соответствии с расстоянием.

Легко увидеть здесь все уже знакомые нам элементы. С помощью глаза (датчик) охотник устанавливает положение цели. По линии связи (нервная система охотника) данные о положении цели передаются усилителям (мышцы), которые с помощью исполнительного механизма (руки) устанавливают нужное положение ствола. Обычно перед выстрелом охотник некоторое время, как говорится, ведет стволом, изменяя его направление в соответствии с изменениями положения утки, а эти изменения воспринимаются датчиком (глаз).

Следовательно, снова замкнутая система. В данном случае движение исполнительного органа (ствола) определяется планом, а этот план задается движением цели. Однако последний пример имеет одно принципиальное отличие от всех примеров, рассмотренных выше. Дело в том, что начиная с момента нажатия собачки, система регулирования (охотник) полностью теряет контроль над объектом

регулирования (летящий заряд). Перемещение заряда в пространстве совершается под воздействием поля тяготения Земли, а также таких случайных возмущений, как, например, ветер, и изменить направление этого перемещения охотник при всем своем желании уже не в силах. Существенно здесь то, что автоматическая система бездействует не потому, что отсутствуют отклонения, как это было во всех примерах, разобранных выше, а потому, что возможность управления отсутствует в силу специфических особенностей самой системы. Выстрел окажется успешным только в том случае, если охотник правильно рассчитал точку встречи заряда и цели. Такой расчет производится в предположении, что траектория полета утки, вообще говоря, не изменится в течение ближайшего времени. Охотник ведет стволом именно для того, чтобы определить эту траекторию и рассчитать (экстраполировать) продолжение траектории.

Предположение о том, что утка будет продолжать лететь по той же самой траектории, как правило, оказывается достаточно обоснованным. Ведь в подавляющем большинстве случаев утка не подозревает о наличии охотника. Однако, если по каким-то своим утиным делам она в момент нажатия на собачку вздумает изменить направление полета, выстрел почти наверняка окажется неудачным для охотника.

Аналогичная ситуация возникает и при стрельбе из зенитных орудий по самолетам. Правда, здесь положение резко усложняется тем, что летчик, попавший в зону зенитного огня, начинает совершать так называемый противозенитный маневр, т. е. изменяет траекторию полета самолета по возможности случайным образом. Снова мы имеем аналогию с игрой, правда, в этой игре ставки неизмеримо выше. Стратегия одного из игроков — это последовательные изменения направления ствола оружия и определение момента времени, когда надо сделать ход (выстрел). Стратегия другого игрока в том, чтобы должным образом менять направление полета. Участвует в этой игре и третий игрок — ветер. На первый взгляд, у третьего игрока в отличие от первых двух нет определенной цели и поэтому включение его в число играющих вызывает сомнения. Ведь не считаем же мы игроком колоду карт, хотя расположение карт в этой колоде очевидным образом сказывается на протекании игры. К этому вопросу мы еще вернемся Существенным в последнем примере является то, что в определенных ситуациях предугадать даже ближайший ход противника оказывается значительно сложнее, чем в случае паровой машины.

Обобщим теперь все полученные сведения, снова привлекая концепцию черного ящика. Так, мы имеем два вида систем: разомкнутые и замкнутые. Заметим, что мы сознательно не говорим здесь автоматических, поскольку пока что мы не установили никаких различий между поведением живого игрока и ПИД-регулятора. Моделью разомкнутой системы может служить схема, показанная на рис. 30. Она состоит из носителя *Н*, на котором зафиксирован план, или программа, работы. План с носителя прочитывается датчиком и передается по каналу связи к усилителю. Выходной сигнал усилителя приводит в действие исполнительный механизм.

Носитель с зафиксированной на нем программой — вот то новое, что мы внесли в модель на рис. 30 по сравнению со всеми ранее рассмотренными моделями. Включая такой носитель в состав системы, мы можем говорить уже о системе управления, а не о системе регулирования, как это было раньше. Следовательно, разомкнутая

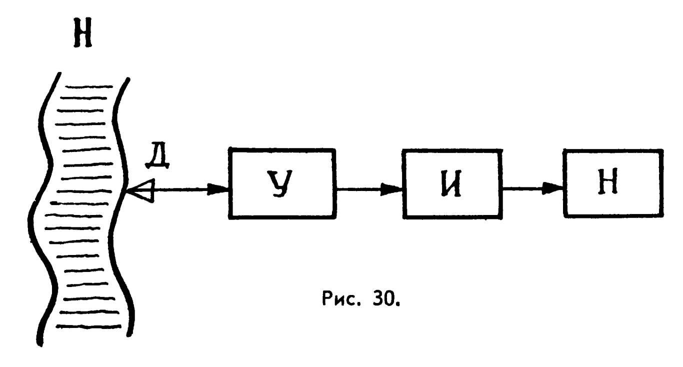


Рис. 30.

система управления содержит в своем составе четыре знакомых нам элемента и, кроме того, носитель. Главная и единственная отличительная черта разомкнутой системы состоит в том, что в ней отсутствует обратная связь между исполнительным механизмом и датчиком.

Модель замкнутой системы управления показана на рис. 31. Кроме перечисленных элементов, здесь введен еще один дополнительный элемент, определяющий стратегию управления, — носитель с зафиксированной на нем программой. В остальном модель на рис. 31 не отличается от рассмотренных раньше и, следовательно, не требует дополнительных пояснений.

Два обстоятельства, связанные с моделью, показанной на рис. 31, позволили нам провести аналогию между замкнутой системой управления и игроком. Первая — то, что объект управления подвергается случайным внешним возмущениям и сам вследствие этого совершает действия, которые могут рассматриваться как случайные события. Именно это и дало нам возможность сравнить объект управления с противником, ходы которого нельзя в точности предсказать заранее. Второе обстоятельство — это наличие в составе системы управления элемента, определяющего стратегию управления. Сосредоточим на некоторое время наше внимание именно на этом элементе.

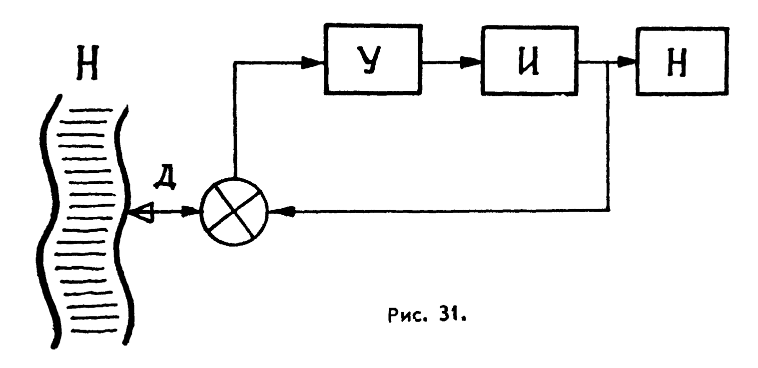


Рис. 31.

Отметим одну особенность предыдущего изложения, которая, возможно, ускользнула от внимания читателя. Когда речь шла об игроке, мы говорили, что он предугадывает или, во всяком случае, должен предугадывать ближайший ход противника. Перейдя к охотнику, мы стали говорить, что он рассчитывает точку встречи. То же самое относилось и к стрелку из зенитного орудия. Угадывает или рассчитывает? Что это, простая вольность слов, допущенная авторами, или в этом-то и заключается некое принципиальное различие между игроком и охотником? Но ведь мы неоднократно подчеркивали, что предполагается именно случайное поведение объекта. Если это и не совсем справедливо применительно к утке, то явно справедливо применительно к самолету, совершающему противозенитный маневр. Но тогда возникает вопрос: можно ли рассчитать заранее момент наступления случайного события или, в более общем случае, характер протекания случайного процесса [1], если по самому определению случайными мы называем такие события, моменты наступления которых нам неизвестны?

Подобный вопрос заинтересовал в свое время некоего кавалера де Мере. Это было в середине XVII века. Кавалер де Мере подобно кавалеру, грустную судьбу которого мы описали во вступлении к этой главе, также не чуждался азартных игр. Правда, в отличие от своего неудачливого коллеги он не проиграл состояние и ему не пришлось нарушать покой старой графини. Однако, будучи по своему времени образованным человеком, кавалер де Мере задумался о том, может ли игрок рассчитывать средствами математики свои шансы в игре и определять стратегию на основании такого расчета. Со своими сомнениями кавалер обратился к одному из образованнейших и талантливейших людей того времени Блезу Паскалю.

В 1653 г. со своими знатными друзьями — герцогом Роанским, кавалером де Мере и Дамьеном Митоном — Паскаль ездил в Пуату. Во время этого путешествия де Мере и задал Паскалю свои два вопроса об азартных играх. Правда, на первый из этих вопросов де Мере оказался в состоянии ответить сам. Вопросы кавалера де Мере послужили основанием для переписки между Паскалем и другим великим французским математиком Ферма. Три письма Паскаля к Ферма от 29 июля, 24 августа и 27 октября 1654 г. положили начало новой отрасли математики, названной теорией вероятностей. Значительно позже, уже в XX веке, методы теории вероятностей были положены в основу создания другой теории, названной теорией игр. Теория игр сама по себе не является вероятностной теорией, и методы теории вероятностей используются в ней как средство получения некоторых решений. Однако вернемся к началу нашего рассказа.

Размышляя над задачами кавалера де Мере, Паскаль поставил перед собой вопрос: можно ли применить к случайным событиям, т. е. к событиям, о которых, грубо говоря, мы ничего не знаем, кроме того, что каждое такое событие рано или поздно наступает, какую-либо количественную меру? Оказывается, количественной мерой случайного события может служить *вероятность* его наступления.

Представим себе ситуацию, которая может иметь несколько различных исходов, случайных в том смысле, что мы не знаем заранее, какой именно из этих исходов наступит. Пусть, например, подобная

---

[1] Случайным процессом называется последовательность отдельных случайных событий.

ситуация состоит в том, что в воздухе находится подброшенная игральная кость. Исход ситуации — падение кости на стол определенной стороной вверх. Всего у кости шесть сторон, а следовательно, у данной ситуации шесть возможных исходов. Предположим теперь, что мы подбросили кость очень много раз подряд и посчитали, сколько раз выпала единица, сколько раз двойка и так далее до шестерки. Величину m_1/n, где m_1 — количество случаев, когда выпала единица, а n — общее количество бросаний кости, назовем частотой выпадания единицы. Аналогичным образом можно определить частоту выпадания двойки или других сторон кости. По мере увеличения количества бросаний частота будет стремиться к определенной величине. Эта величина и называется вероятностью.

Математически то же самое можно записать следующим образом:

$$p_j = \lim_{n \to \infty} \frac{m_j}{n},$$

где p_1 — вероятность выпадания единицы, p_2 — вероятность выпадания двойки и так далее, p_6 — вероятность выпадания шестерки.

Если кость представляет собой куб правильной формы, то вероятности выпадания всех ее сторон окажутся равными в точности одной шестой. Вообще из самого способа определения вероятности мы можем заключить, что вероятность — это положительная величина, заведомо не большая единицы.

Продолжая бросать игральную кость, мы легко можем прийти также к выводу, что частота выпадания двух каких-либо граней, скажем, либо двойки, либо четверки, в точности равна сумме частот выпадания каждой из них в отдельности. То же самое справедливо и для вероятностей. Вероятность исхода, состоящего в том, что имеет место хотя бы один из двух каких-либо исходов, равна сумме вероятностей каждого из этих исходов в отдельности. Эта знаменитая теорема сложения вероятностей, также открытая Паскалем, справедлива только тогда, когда ситуации несовместны, т. е. исходы каждой из них никак не зависят от исходов предыдущих ситуаций.

Паскалем была сформулирована также и другая теорема: для независимых ситуаций вероятность сложного исхода, состоящего в том, что в двух следующих друг за другом ситуациях сначала наступит исход *А*, а затем исход *Б*, равна произведению вероятностей каждого исхода в отдельности. Другими словами, вероятность того, что при двух последовательных бросаниях кости выпадут две шестерки подряд, равна 1/36. К слову сказать, это и есть ответ на первый вопрос кавалера де Мере.

Мы не намерены здесь излагать даже самые элементарные сведения из области теории вероятностей, потому что это уже с успехом сделали до нас другие авторы[1]. Однако из того, что уже сказано, можно сделать выводы, которые сыграют в дальнейшем очень важную роль.

Во-первых, теория вероятностей позволяет применять к случайным событиям количественную меру. Такой мерой является вероятность наступления этих событий. Во-вторых, для определения величины вероятности требуется наблюдать достаточно большое количество исходов независимых ситуаций. Наконец, в-третьих, знание ве-

---

[1] Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1962.

роятности наступления события не приносит особой пользы, если рассматривается лишь одно-единственное событие данного типа.

Последний вывод не столь очевиден, как два предыдущих, поэтому обсудим его несколько подробнее. Рассмотрим одну из простейших азартных игр, состоящую в подбрасывании монетки. Пусть условия игры состоят в следующем. Один из игроков подбрасывает монетку, а другой берется угадать, на какую сторону она упадет. При правильном угадывании он получает, а при неправильном отдает определенную сумму, причем величина суммы назначается перед каждым подбрасыванием.

Если монетка имеет абсолютно правильную форму, то вероятность выпадания герба та же, что и вероятность выпадания решетки, и равна $^1/_2$. Ясно, что если вся игра сводится к одному только подбрасыванию, знание вероятности выпадания герба и решетки ничего не дает ни тому, ни другому игроку.

Предположим теперь, что вся игра состоит не из одного, а из четырех независимых подбрасываний. Предположим также, что три подбрасывания уже имели место и при этом каждый раз выпадала решетка. Каковы вероятности выпадания сторон при четвертом подбрасывании? Согласно теореме умножения вероятностей вероятность того, что решетка выпадет и в четвертый раз, т. е. четыре раза подряд, равна 1/16. На основании теоремы сложения вероятностей вероятность того, что выпадет либо герб, либо решетка, равна единице. Следовательно, в рассматриваемой ситуации вероятность того, что при четвертом бросании выпадет герб, равна:

$$1-\frac{1}{16}=\frac{15}{16}.$$

Это очень большая вероятность, и, казалось бы, у отгадывающего есть все основания поставить на герб достаточно большую сумму. Однако вряд ли все сказанное послужит ему утешением, если монета все-таки и в четвертый раз упадет решеткой кверху. А это вполне может случиться. Вспомним, что события, по определению, независимы, следовательно, у подброшенной в четвертый раз монеты ровно столько же шансов упасть вверх решеткой, сколько и гербом. Этот кажущийся парадокс на самом деле не является парадоксом, а свидетельствует лишь о необходимости хорошо разобраться в сущности самого понятия вероятности.

Подобно тому, как выше мы ввели понятие вероятности простого события, т. е. события, состоящего в наступлении одного какого-либо исхода, можно ввести понятие вероятности более сложных событий, состоящих в одновременном наступлении нескольких различных исходов. Например, запись $p(A, B)$ означает вероятность сложного события, состоящего в том, что одновременно наступают исход A и исход B. Если бросить две игральных кости, то они одновременно упадут на стол и каждая из них ляжет вверх какой-нибудь стороной. Пусть A — это событие, состоящее в том, что первая кость упала вверх стороной A, а B — это событие, состоящее в том, что вторая кость упала вверх стороной B. Тогда запись $p(A, B)$ будет вероятностью наступления сложного события, связанного с положениями обеих костей. Сложные события могут состоять из трех и более исходов. Вероятность сложного события определяется точно так же, как и простого, т. е. подсчитывается частота наступлений сложного события и рассматривается предельное значение этой частоты при

устремлении количества испытаний к бесконечности. Если отдельные исходы, составляющие сложное событие, взаимонезависимы, то на основании теоремы умножения вероятностей будет справедливо равенство

$$p(A, B) = p(A)\,p(B).$$

Существенное значение в приложениях теории вероятностей имеет также понятие условной вероятности. По определению, условной вероятностью $p(A/B)$ наступления исхода A, если известно, что перед этим имел место исход B, называется величина

$$p(A/B) = \frac{p(A, B)}{p(B)}.$$

Условную вероятность необязательно вычислять по только что приведенной формуле. Ее можно получить и непосредственно из экспериментов точно так же, как мы поступали выше. Для этого нужно регистрировать все случаи, когда исход A наступает вслед за исходом B. Затем подсчитывается частота этих случаев. Сказанное свидетельствует о том, что условная вероятность суть такая же объективная мера, как и обычные вероятности простых и сложных событий.

Покажем теперь, как понятие условной вероятности позволяет разрешить отмеченный нами выше парадокс. Предположим снова, что мы подбрасываем монетку четыре раза подряд. Исход каждого подбрасывания — это независимое событие, поэтому вероятность сложного события, состоящего в том, что три раза подряд монетка выпадала решеткой вверх, согласно теореме умножения вероятностей равна $^1/_8$. Обозначим эту вероятность через $p(B)$.

Вероятность сложного события, состоящего в том, что при трехкратном подбрасывании монеты каждой раз выпадала решетка и при четвертом следующем подбрасывании тоже выпадет решетка [обозначим эту вероятность через $p(A, B)$], согласно теореме умножения вероятностей равна:

$$p(A, B) = p(B)\,p(A) = \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{16}.$$

Именно эту величину мы и получили выше. Но существенное обстоятельство заключается здесь в том, что, подбрасывая монету в четвертый раз, мы *знаем* результаты трех предыдущих подбрасываний. Следовательно, здесь мы должны пользоваться понятием условной вероятности, т. е. определять вероятность выпадания решетки, если известно, что перед этим три раза подряд выпадала решетка. Эта вероятность равна:

$$p(A/B) = \frac{p(A, B)}{p(B)} = \frac{\frac{1}{16}}{\frac{1}{8}} = \frac{1}{2}.$$

Теперь все встает на свои места. Ведь все, что происходит, когда подбрасывается в воздух монета, никак не зависит от того, подбрасывается она в первый или не в первый раз. Именно это обстоятельство и представляет собой существо утверждения о незави-

симости исходов. Поэтому когда мы бросаем монету и при этом не знаем, имели ли место предыдущие подбрасывания, мы с полным основанием можем считать, что монетка подбрасывается впервые, и пользоваться понятием вероятности простого события. Если же мы знаем результаты предыдущих испытаний, то надо пользоваться условной вероятностью. Как было только что показано, результат в обоих случаях один и тот же.

Приведем еще более разительный пример. Пусть имеется колода, состоящая из шестнадцати карт: четыре туза, четыре короля, четыре дамы и четыре валета четырех различных мастей. Посчитаем, какова вероятность того, что после перетасовки колоды карты окажутся сложенными в любом заданном порядке. Карта, лежащая сверху, может быть любой из шестнадцати. Следовательно, вероятность того, что сверху окажется, например, туз пик, равна $^1/_{16}$. Второй по порядку может оказаться любая из оставшихся пятнадцати карт, и вероятность для любой из них оказаться в этом положении равна $^1/_{15}$. Продолжая подобные рассуждения, приходим к выводу, что вероятность картам оказаться сложенными в данном порядке равна:

$$\frac{1}{16}\cdot\frac{1}{15}\cdot\frac{1}{14}\cdot\frac{1}{13}\cdot\frac{1}{12}\cdot\frac{1}{11}\cdot\frac{1}{10}\cdot\frac{1}{9}\cdot\frac{1}{8}\cdot\frac{1}{7}\cdot\frac{1}{6}\times$$
$$\times\frac{1}{5}\cdot\frac{1}{4}\cdot\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{2}\cdot 1,$$

что примерно составляет 0,00000000000005. Это исчезающе малая величина, и все же после каждой перетасовки колоды карты оказываются сложенными в некотором определенном порядке, т. е. осуществляется событие, имеющее столь малую вероятность наступления. Более того, оно происходит каждый раз после очередной перетасовки карт.

К какому же выводу приводят нас эти примеры? Для игрока в азартные игры вывод очевиден — не надо ставить на карту все, даже когда вероятность выигрыша очень велика. Лучше всего вообще не играть в азартные игры. С другой стороны, по тем же самым соображениям имеет прямой смысл покупать лотерейные билеты. Ведь как бы ни мала была вероятность выиграть, например, автомобиль, такой выигрыш выпадает в каждом розыгрыше и у купившего билет ничуть не меньше шансов получить этот выигрыш, чем любого другого, также купившего один билет.

Иначе оборачивается дело, когда рассматривается не одно случайное событие, а последовательность большого количества таких событий — случайный процесс. Вспомним, что с самого начала мы определили вероятность как предел, к которому стремится частота исходов при условии, что количество независимых ситуаций, порождающих эти исходы, неограниченно растет. Отсюда можно сделать заключение, что вероятность представляет собой некую меру частоты исходов.

Поясним сказанное еще на одном примере. Пусть снова двое играют, подбрасывая монету, причем на этот раз ставка при каждом подбрасывании остается неизменной. Чем больше было количество подбрасываний, тем ближе будет частота выпаданий, например, герба к $^1/_2$. Следовательно, если стратегия отгадывающего состоит в том, чтобы каждый раз загадывать герб, то с увеличением количества

подбрасываний вероятность окончания игры вничью увеличивается и при бесконечном количестве подбрасываний вероятность превратится в достоверность.

Этот последний пример дает нам уже определенную идею о том, как используются методы теории вероятностей при разработке стратегий и, в частности, стратегии управления. Заметим попутно, что если игроки пользуются правильной монеткой, то не существует стратегии, которая приводила бы одну из сторон к выигрышу при достаточно большом количестве подбрасываний.

Но цель, которая стоит перед игроком, называемым системой автоматического (или не автоматического) управления, состоит именно в том, чтобы получить выигрыш. Наш краткий экскурс в область теории вероятностей пока позволил сделать в этом плане лишь пессимистические выводы. Но не будем отчаиваться. Дело в том, что в природе очень редко встречаются абсолютно правильные игральные кости или монеты. Именно это обстоятельство и позволяет в подавляющем большинстве случаев верно построить стратегию игры и получить желаемый выигрыш. Более подробно мы рассмотрим этот вопрос позднее, а пока ограничимся лишь указанием на следующее.

В состав системы автоматического управления замкнутого типа входит элемент, занимающийся разработкой стратегии управления. Согласно всему сказанному ранее этот элемент должен решать по меньшей мере две самостоятельные задачи: определять вероятности наступления тех или иных событий и на основании знания этих вероятностей разрабатывать стратегию управления.

Теперь мы можем вернуться к тому, что побудило нас обсуждать поведение кавалера де Мере, а также последствия, вызванные его любознательностью к различию понятий «угадать» и «рассчитать». Мы уже знаем, что предугадать наступление того или иного события можно, рассчитав его вероятность. При этом остается в силе все сказанное по поводу одиночных событий. Система управления, работающая по принципу расчета-предугадывания, никогда не может гарантировать того, что наступление каждого отдельного события будет предугадано правильно. Однако частота правильных отгадываний может быть достаточно высокой.

Вернемся еще раз к вопросу о различии между разомкнутой и замкнутой системами. Мы неоднократно отмечали то обстоятельство, что обратная связь в замкнутой системе вступает в действие, т. е. система по-настоящему оказывается замкнутой лишь тогда, когда значения регулируемого параметра отклоняются от значений, предписанных программой. В общем случае и при отсутствии таких отклонений система может выполнять достаточно сложные действия. Поскольку при отсутствии отклонений обратная связь не работает и ее можно исключить из рассмотрения, в промежутках между отклонениями замкнутая система работает, как разомкнутая. Иными словами, разомкнутая система представляет собой как бы частный случай замкнутой системы.

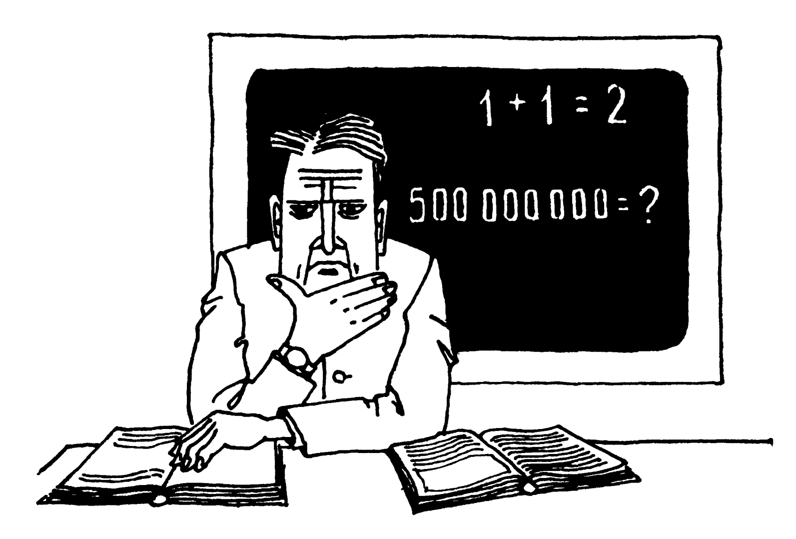
Разовьем эту мысль еще дальше. Истинной стратегией игры против внешних возмущений является последовательность управляющих воздействий, поступающих в нашей модели (см. рис. 31) на вход усилителя. Однако часть этой модели, состоящая из усилителя, исполнительного механизма и объекта, ничем не отличается от усилителя, исполнительного механизма и объекта в модели разомкнутого типа системы, показанной на рис. 30.

Это позволяет нам рассматривать программу, записанную на носителе в разомкнутой системе управления, как стратегию управления. Можно рассуждать и с противоположных позиций. Стратегия управления в системе управления замкнутого типа состоит как бы из двух частей, одна из которых задана заранее и зафиксирована на носителе, а другая формируется в процессе управления в ответ на воздействие внешней среды. Например, при игре в шахматы первая часть стратегии содержит правила ходов различными фигурами, а также некоторые неизменные правила разыгрывания дебютов и эндшпилей. Вторая часть строится игроком в зависимости от поведения противника.

Заметим в заключение, что в достаточно большом числе реальных ситуаций поведение внешней среды может быть предсказано, во всяком случае принципиально, на достаточно большое время вперед. Следовательно, существует принципиальная возможность обходиться в этих случаях системами разомкнутого типа, задавая им, однако, чрезвычайно сложные программы. Но на практике так обычно не поступают именно из-за сложности программ.

Хорошим примером служит система управления уличным освещением городов. Моменты наступления темноты можно предсказать наперед на сколь угодно долгое время. Поэтому управлять включением и выключением уличного освещения в принципе можно было бы с помощью сложного часового механизма, отсчитывающего не только время суток, но и время года. Но ведь гораздо проще заменить этот часовой механизм одним-единственным фотоэлементом, который действительно выдает сигнал в тот момент, когда освещенность его падает ниже заданного уровня.

Именно так и поступают на практике. Разомкнутые системы управления оказываются целесобразными лишь тогда, когда стратегия управления достаточно проста. Во всех прочих случаях используются замкнутые системы. По этой причине и мы на страницах нашей книги распрощаемся с разомкнутыми системами. Заодно, как это ни тяжело, мы распрощаемся с лягушками и автомобилями, с мамонтами и мылом. Все они были нужны нам только для того, чтобы сформулировать некоторые основные принципы кибернетики и показать, что эти принципы остаются неизменными как в живых, естественных системах, так и в искусственно создаваемых устройствах. Подобная неизменность привела нас к понятию модели. Дальнейшее рассмотрение мы поведем лишь применительно к моделям, ни на минуту не забывая, однако, что эти модели суть лишь описание определенных свойств, в равной степени присущих и мамонтам, и автомобилям, и лягушкам, и даже мылу.



«— Три да два — пять. Пять да семь — двенадцать. Двенадцать да три — пятнадцать. Добрый день. Пятнадцать да семь — двадцать два. Двадцать два да шесть — двадцать восемь. Некогда спичкой чиркнуть. Двадцать шесть да пять — тридцать один. Уф! Итого, стало быть, пятьсот один миллион шестьсот двадцать две тысячи семьсот тридцать один.

— Пятьсот миллионов чего?

— А? Ты еще здесь? Пятьсот миллионов... Уж не знаю, чего... У меня столько работы! Я человек серьезный, мне не до болтовни! Два да пять — семь.

— ПЯТЬСОТ МИЛЛИОНОВ ЧЕГО!

(ГЛАВА СЕДЬМАЯ)

— повторил Маленький принц: спросив о чем-нибудь, он не успокаивался, пока не получал ответа».

Этот отрывок из «Маленького принца» Сент-Экзюпери мы привели здесь потому, что нам самим необходимо срочно научиться считать. Это убедительно следует из всего того, что было сказано в предыдущей главе. Правда, кое-что мы уже умеем. В пятой главе мы научились вычислять интеграл с помощью цилиндра с золотником и брать производную с помощью еще более простого устройства, состоящего из кусочка металла, подвешенного на двух пружинках. Строго говоря, это устройство вычисляло ускорение, т. е. вторую производную по времени. Однако поскольку регулируемым параметром — интересующей нас величиной — была скорость, то отклонение грузика оказывалось пропорциональным первой производной от регулируемого параметра по времени.

Такие вычислительные устройства получили название *аналоговых.* Названы они так потому, что в своей работе подобные устрой-

ства используют метод аналогий. Сущность метода аналогий была хорошо известна Тому Сойеру. Чтобы подтвердить это, приведем еще один маленький отрывок, на этот раз из Марка Твена:

«Он подумал, что, пожалуй, стоило бы отыскать шарик, который он забросил, и терпеливо принялся за розыски. Но найти шарик не мог. Тогда он вернулся к тайнику, стал на то самое место, с которого бросал шарик, вынул из кармана второй шарик и бросил его в том же направлении, приговаривая:

— Брат, ступай ищи брата!

Он заметил, куда упал шарик, побежал туда и стал искать. Должно быть, шарик упал слишком близко или слишком далеко. Том проделал то же самое еще два раза. Последняя проба удалась: шарики лежали в двух шагах друг от друга».

Интересно, как решил бы подобную задачу отдаленный потомок Тома Сойера, если бы он отправился в лес, снабженный последней моделью карманной цифровой вычислительной машины «настоящей Барлоу»? Такая машина могла бы оказать Тому массу неоценимых услуг, особенно на экзаменах в воскресной школе, но помочь найти шарик, брошенный в сторону, она бы, наверное, не смогла. Действительно, для решения подобной «баллистической» задачи в машину необходимо ввести начальные условия, т. е. направление, в котором брошен шарик, и его начальную скорость. В принципе это, конечно, возможно, но потребовалась бы измерительная аппаратура, во много раз более сложная, чем та примитивная «вычислительная машина», которой пользовался Том. Вот она, сила аналогий!

Все это, конечно, шутка, однако над многим в коротком рассказе, который мы привели здесь, и особенно над тем, что шарик был найден только с третьей попытки, стоит серьезно задуматься. Специалист по аналоговой технике сказал бы, что с помощью своей «вычислительной машины» Том решал «краевую баллистическую задачу со случайными параметрами, используя при этом метод периодизации решений». Но не будем углубляться в терминологию. Заметим только, что аналоговая вычислительная машина, опираясь на существующие в природе аналогии, воспроизводит физический процесс именно так, как он происходит на самом деле. При этом для исследования полета шарика совсем не обязательно, как это делал Том, пользоваться другим таким же точно шариком. Можно использовать любую физическую систему, например электрическую цепь. Требуется только, чтобы процессы в выбранной физической системе описывались математическими уравнениями, которыми описывается исследуемый процесс. Отсюда и название — метод аналогий.

Выбираемая для исследования физическая система называется моделью исследуемой системы. Заметим, что процессы в модели оказываются аналогичными процессам в используемой системе лишь приблизительно по той причине, что никакие уравнения не могут описать происходящие в природе явления абсолютно точно со всеми мельчайшими подробностями. Поэтому и получаемое решение лишь приближенно соответствует истине. Не учтенные при описании, как говорят, «малые» параметры выступают здесь в роли случайных возмущений. Из-за их влияния Тому и пришлось бросать шарик три раза.

В настоящее время аналоговая вычислительная техника представляет собой мощнейшее средство для решения сложных задач, сводящихся в основном к дифференциальным уравнениям. Чрезвычайно широко используется она и во всевозможных автоматических

системах. Вспомним, однако, что в предыдущей главе мы столкнулись с необходимостью определять вероятности различных явлений, а для этого, как также было установлено выше, надо уметь главным образом складывать и делить. Поэтому всех интересующихся принципом действия и возможностями аналоговых вычислительных машин мы отсылаем к специальной литературе[1] и переходим к рассмотрению другого класса средств вычислительной техники — цифровых вычислительных машин.

Для того чтобы представить себе принцип действия цифровой вычислительной машины, вернемся еще раз к вступлению. Странствуя по планетам, Маленький принц встретился с Деловым человеком, который считал звезды, толком не зная, что он считает и зачем ему это нужно. Это занятие роднит его с цифровой вычислительной машиной, которая также не знает, что она считает. Разовьем эту идею еще дальше. Представим себе человека, который хочет сосчитать звезды, но не хочет при этом научиться даже складывать. Тогда ему очень поможет устройство, к описанию которого мы и переходим.

Наше устройство представляет собой деревянный ящик, наполненный карточками (рис. 32). Точно такие ящики читатель наверняка встречал в каталоге любой библиотеки. На каждой карточке написан ее порядковый номер, и в ящик они сложены по номерам, т. е. первой по порядку лежит карточка номер 1, а последней — у противоположной стенки ящика — лежит карточка, например, с номером 200.

Посмотрим, как можно использовать подобное устройство для складывания чисел. Условимся, что складывать надо любые числа, состоящие не более чем из девяти цифр. Пусть, например, нужно сложить 29 783 и 37 561. Поступим следующим образом. Вытащим из ящика карточки с порядковыми номерами от 1 до 9 и запишем на этих карточках первое слагаемое, начиная с младшей цифры. Иными словами, на карточке номер 1 напишем цифру 3, на карточке номер 2 — цифру 8 и так далее, а на карточке номер 5 — цифру 2. На карточках от номера 6 до номера 10 напишем нули.

Положим взятые карточки на место, вытащим карточки с номерами от 11 до 20 и точно таким же образом запишем на них второе слагаемое, т. е. на карточке номер 11 запишем цифру 1 и так далее, а на карточке номер 15 — цифру 3. На карточках от номера 16 по номер 20 записываем нули. Операция, которую мы только что проделали, называется *вводом исходных данных.*

Поставим карточки 11—20 на место и извлечем из ящика карточку номер 100. На ней написано такое правило:

Достаньте из ящика карточку номер 99 и напишите на ней с левой стороны одно под другим числа 1, 11, 21, 22 и 31. После этого выполняйте правило, написанное на следующей по порядку карточке, т. е. на карточке с номером 101.

Выполним неукоснительно все то, что предписывает это правило. Тогда карточка номер 99 приобретет вид,

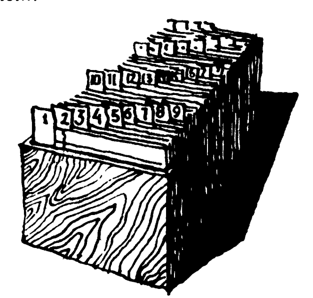


Рис. 32.

[1] А. В. Шилейко, Основы аналоговой вычислительной техники. М., «Энергия», 1971.

показанный на рис. 33 Кроме того, выполняя предыдущее правило, мы уже извлекли из ящика карточку номер 101. На ней написано:

Достаньте из ящика карточки, номера которых записаны на карточке номер 99, и разложите их в том же порядке Затем выполняйте правило, записанное на карточке номер 102.

Снова неукоснительно выполняем это правило, т. е. достаем из ящика карточки с номерами 1, 11, 21, 22 и 31 и кладем их на стол так, чтобы сверху оказалась карточка номер 1, под ней карточка номер 11, затем карточки с номерами 21 и 22 и, наконец, в самом низу карточка номер 31. Предположим также, что на карточке номер 21 кто-то уже написал 0.

Правило, записанное на карточке номер 102, гласит:

Если на трех карточках, лежащих сверху, записаны нули, то запишите нули также и на двух остальных карточках и выполняйте правило, записанное на карточке номер 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке, т. е. на карточке номер 103.

В нашем случае явно приходится выполнять вторую часть этого правила, т. е. извлекать карточку номер 103 и выполнять то, что на ней написано. На карточке номер 103 и следующих за ней написаны такие правила:

103. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 1,0,0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 0, а на пятую 1, после чего переходите к выполнению правила, записанного на карточке номер 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

104. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 1, 1, 0 или 2, 0, 0, на четвертую сверху карточку запишите 0, а на пятую 2, после чего переходите к выполнению правила, записанного на карточке номер 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

105. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 1,1,1, или 2,1,0, или 3,0,0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 0, а на пятую 3, после чего переходите к выполнению правила, записанного на карточке номер 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

106. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 2,1,1, или 2,2,0, или 3,1,0, или 4,0,0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 0, а на пятую 4, после чего переходите к выполнению правила, записанного на карточке номер 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

107. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 3, 1, 1, или 2, 2, 1, или 3, 2, 0, или 4, 1, 0 или 5, 0, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 0, а на пятую 5, после чего переходите к выполнению правила, записанного на карточке номер 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

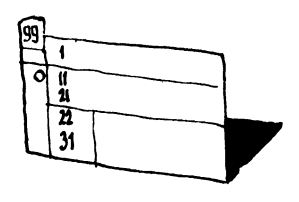


Рис. 33.

108. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 4, 1, 1, или 3, 2, 1, или 4, 2, 0, или 5, 1, 0, или 6, 0, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 0, а на пятую 6, после чего переходите к выполнению правила 200 В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

109. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 5, 1, 1, или 4, 2, 1, или 3, 3, 1, или 7, 0, 0, или 5, 2, 0, или 4, 3, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 0, на пятую 7, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

110. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 6, 1, 1, или 5, 2, 1, или 4, 3, 1 или 8, 0, 0, или 7, 1, 0, или 6, 2, 0, или 5, 3, 0, или 4, 4, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 0, а на пятую 8, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

111. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 7, 1, 1, или 6, 2, 1, или 5, 3, 1, или 4, 4, 1, или 9, 0, 0, или 8, 1, 0, или 7, 2, 0, или 6, 3, 0, или 5, 4, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 0, а на пятую 9, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

112. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 8, 1, 1, или 7, 2, 1, или 6, 3, 1, или 5, 4, 1, или 5, 5, 0, или 6, 4, 0, или 7, 3 ,0, или 8, 2, 0, или 9, 1, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 1, а на пятую 0, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правивило, записанное на следующей по порядку карточке.

113. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 9, 1, 1, или 8, 2, 1, или 7, 3, 1, или 6, 4, 1, или 5, 5, 1, или 9, 2, 0, или 8, 3, 0, или 7, 4, 0, или 6, 5, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 1, на пятую 1, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

114. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 9, 2, 1, или 8, 3, 1, или 7, 4, 1, или 6, 5, 1, или 9, 3, 0, или 8, 4, 0, или 7, 5, 0, или 6, 6, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 1, а на пятую 2, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

115. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 9, 3, 1, или 8, 4, 1, или 7, 5, 1, или 6, 6, 1, или 9, 4, 0, или 8, 5, 0, или 7, 6, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 1, а на пятую 3, после чего переходите к выполнению правила 200 В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке

116. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 9, 4, 1, или 8, 5, 1, или 7, 6, 1, или 9, 5, 0, или 8, 6, 0, или 7, 7, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 1, а на пятую 4, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

117. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 9, 5, 1, или 8, 6, 1, или 7, 7, 1, или 9, 6, 0, или 8, 7, 0 (в любом

порядке), на четвертую сверху карточку запишите 1, а на пятую 5, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

118. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 9, 6, 1, или 8, 7, 1, или 9, 7, 0, или 8, 8, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 1, а на пятую 6, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

119. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 9, 7, 1, или 8, 8, 1, или 9, 8, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 1, а на пятую 7, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

120. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 9, 8, 1, или 9, 9, 0 (в любом порядке), на четвертую сверху карточку запишите 1, а на пятую 8, после чего переходите к выполнению правила 200. В противном случае выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

121. Если на трех карточках, лежащих сверху, написаны цифры 9, 9, 1, на четвертую сверху карточку запишите 1, а на пятую 9, после чего переходите к выполнению правила 200.

На карточке номер 200 записано следующее сложное правило, которое для удобства мы подразделим на ряд последовательных пунктов:

а) пять карточек, лежащих на столе, положите в ящик на свои места;

б) на карточке номер 99 запишите новую колонку цифр правее предыдущей колонки так, чтобы каждая новая цифра равнялась предыдущей, увеличенной на единицу (старые цифры после этого зачеркните);

в) если новые цифры на карточке номер 99 меньше, чем 10, 20, 30 и 40 соответственно, переходите к выполнению правила, записанного на карточке номер 101. В противном случае ваша работа завершена.

Попробуем теперь проделать все то, что нам предписывают только что сформулированные правила применительно к рассмотренному выше примеру. Перед нами на столе лежат пять карточек, на верхней из них написана цифра 3, на следующей за ней цифра 1 и затем цифра 0. Остальные две карточки пустые. Кроме того, на столе лежит карточка номер 99, на которой слева записана колонка цифр 1, 11, 21, 22, 31 (см. рис. 33).

Начинаем перебирать карточки с номерами 102—121 до тех пор, пока не дойдем до карточки номер 106. Правило, записанное на этой карточке, предписывает нам начертать на карточке, лежащей четвертой сверху (карточка номер 22), цифру 0, а на следующей за ней (карточка номер 31) — цифру 4. После этого, следуя правилу, записанному на карточке 200, мы расставляем пять лежащих перед нами карточек на свои места в ящике. Затем на карточке номер 99, которая остается лежать на столе, мы зачеркиваем 1 и пишем рядом с ней, правее, цифру 2, зачеркиваем цифру 11 и пишем правее ее цифру 12 и т. д. Карточка номер 99, после того как на ней проделано все, что предписывают правила, изображена на рис. 34.

Продолжаем выполнять правила. Извлекаем из ящика пять карточек с номерами 2, 12, 22, 23 и 32 и раскладываем их друг под

другом. Перед нами цифры (в порядке сверху вниз) 8, 6, 0 и две пустые карточки. Это заставляет нас снова начать перебор карточек с номера 102 до тех пор, пока мы не дойдем до карточки номер 116. Выполняя записанные на ней правила, изображаем на карточке номер 23 цифру 1, а на карточке номер 32 — цифру 4. Переходим к выполнению правила, записанного на карточке номер 200, и т. д.

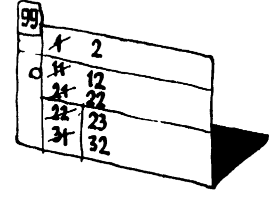


Рис. 34.

Если читатель не поленится довести начатый нами анализ до конца, то он убедится, что на карточках от номера 31 до номера 40 окажется записанным число 0 000 067 344. Мы записали это число так, что крайняя справа — цифра, зафиксированная на карточке номер 31, а крайняя слева — цифра, зафиксированная на карточке номер 40. Ясно также, что это число есть не что иное, как сумма чисел 29 783 и 37 561. Добавим еще, что после всего проделанного карточку номер 99 имеет смысл выбросить и заменить чистой карточкой с таким же точно номером.

То же самое следует проделать и с карточками от номера 1 по номер 40, однако уже после того, как полученный результат будет использован. Теперь наш ящик с карточками подготовлен для сложения следующей пары чисел.

Заметим, что карточки понадобились нам только для того, чтобы записывать на них или, другими словами, запоминать некоторые сведения. Поэтому ящик с карточками мы назовем запоминающим устройством или, еще короче, памятью, а отдельные карточки запоминающего устройства — ячейками.

Заметим также, что отдельные карточки в ящике использовались нами, вообще говоря, по-разному. Так, карточки от номера 1 по номер 20 можно назвать ячейками для хранения исходных данных, или условий задачи. Данные, записанные на этих карточках, нужны лишь до тех пор, пока задача не будет полностью решена. После этого их можно выбросить и заменить пустыми с такими же номерами. К слову сказать, эта операция называется стиранием, или очищением ячеек памяти. Карточки от номера 22 по номер 30 можно назвать ячейками, хранящими промежуточные результаты вычислений. Каждая из них была нам нужна только один раз, когда складывалась соответствующая пара цифр. Поэтому здесь вместо девяти карточек можно было воспользоваться одной, зачеркивая на ней всякий раз предыдущую цифру и записывая новую, но тогда усложнились бы соответствующие правила.

Карточки с номера 31 по номер 40 называют ячейками для хранения результатов. Эти карточки нельзя выбрасывать до тех пор, пока результат не будет тем или иным способом использован. Заметим, что результат может быть использован, в частности, и при решении следующей задачи. Тогда карточки остаются на своих местах.

Интересна роль карточки номер 21. На ней всегда записан 0. Такие карточки мы назовем ячейками, хранящими константы.

На карточке номер 99 мы записывали, зачеркивали и снова записывали цифры, которые непосредственно не участвовали в вычислениях, но использовались нами для установления порядка действий. Такие карточки мы назовем рабочими ячейками.

Наконец, на карточках с номера 100 по номер 121, а также на карточке номер 200 записаны правила или, как сейчас принято говорить, программа вычислений. Читатель уже давно понял, что правила, записанные на карточках с номера 102 по номер 121, есть не что иное, как хорошо известная ему с первого класса таблица сложения. Эту таблицу, а также другие правила, позволяющие решать подчас неизмеримо более сложные задачи, принято называть алгоритмом. Алгоритм вместе с другими вспомогательными правилами, записанными в нашем случае на карточках с номерами 100, 101 и 200, и составляет программу.

Карточки с записанной на них программой играют совершенно исключительную роль. Действительно, если бы на этих карточках ничего не было записано, наша затея потеряла бы всякий смысл, так как никому не известно, что надо делать с ящиком, заполненным карточками. С другой стороны, достаточно изменить хотя бы одно правило программы, как будет решаться совершенно иная задача.

Но в рассмотренном нами примере, кроме ящика с карточками, в решении задачи принимал участие также и человек. Посмотрим подробнее, к чему сводилось это участие.

Во-первых, он должен был что-то записывать на карточках. Во-вторых, он должен был вытаскивать карточки из ящика либо по порядку, либо так, как это предписывалось правилами. Наконец, он должен был читать все, что написано на карточках, и выполнять правила. Если все организовать именно так, как было описано выше, то чтение и выполнение правил практически не требует никаких специальных знаний и способностей.

Действительно, возьмем на выбор какое-нибудь правило, например правило, записанное на карточке номер 114, и разобьем его на пункты, как это уже делалось выше. Тогда правило 114 приобретет следующий вид:

а) определите, имеются ли на трех карточках, лежащих сверху, цифры 9, 2, 1, или 8, 3, 1, или 7, 4, 1, или 6, 5, 1, или 8, 4, 0, или 7, 5, 0, или 6, 6, 0 (в любом порядке);

б) если результат, полученный при выполнении п. а), положителен на четвертую сверху карту напишите 1, а на пятую 2, после чего переходите к выполнению правила 200;

в) если результат, полученный при выполнении п. а), отрицательный, выполняйте правило, записанное на следующей по порядку карточке.

Рассмотрим сначала п. а). Ясно, что цифры, которые надо искать на трех карточках, лежащих на столе, записаны на карточке номер 114. Следовательно, действия, которые надо выполнять в соответствии с п. а), — *сравнение* цифр, записанных на двух различных карточках. Такое сравнение выполнить исключительно просто, если предположить, что карточки прозрачные, а все записанные на них цифры имеют одинаковые размеры и одинаковый шрифт. Тогда достаточно наложить одну карточку на другую и посмотреть их на просвет. Автоматизировать такую операцию проще простого.

Результатом выполнения п а) может быть только один из двух ответов — либо да, если искомая тройка цифр действительно обнаружена, либо нет — в противном случае. Каждый из этих ответов побуждает в свою очередь выполнять либо п. б), либо п. в). Иными словами, возникает ситуация, когда в зависимости от результата выполнения первого действия осуществляется переход к выполнению либо второго, либо третьего пункта. Действие, выполняемое в по-

добной ситуации, называется *переходом по точному совпадению.* При этом совершенно неважно, что с чем совпадает, ведь вместо цифр на карточках могут быть изображены любые значки.

Пункт б) требует записать на четвертую карточку 1, а на пятую 2. Подобная операция легко может быть автоматизирована — это ясно без слов Отметим только, что, выполняя данную операцию, мы как бы *пересылаем*, например, цифру 1 с карточки номер 114 на карточку, лежащую на столе четвертой сверху. Поэтому рассмотренная операция и получила название операции *пересылки.*

Наконец, п. в), предписывает нам вытащить карточку, стоящую в ящике следующей по порядку или, другими словами, увеличить номер предыдущей карточки на единицу. Эту операцию также чрезвычайно просто автоматизировать, если номера карточек, например, не записывать цифрами, а пробивать на карточках отверстия, количество которых совпадает с порядковым номером карточки. Тогда увеличить номер на единицу, значит, просто пробить одно дополнительное отверстие. Порядковый номер карточки принято называть ее *адресом*, поэтому и сама только что рассмотренная операция получила название операции *переадресации на единицу.*

Снабдим наш ящик с карточками автоматом, способным выполнять три перечисленные выше операции: операцию перехода по точному совпадению, операцию пересылки и операцию переадресации на единицу. Если этот автомат работает в соответствии с еще одним правилом, а именно всегда начинает работу с просмотра карточки номер 100, то мы сможем полностью избавиться от услуг человека. Точнее, на долю человека выпадет теперь только необходимость записывать на отведенных для этого карточках исходные данные. Сам автомат, очевидно, относится к числу простейших. Согласно той классификации, которую мы провели в предыдущих главах, это автомат разомкнутого типа, выполняющий заданную раз и навсегда последовательность действий. Но такой автомат, соединенный с ящиком, заполненным карточками, — это и есть цифровая вычислительная машина.

Чтобы устранить возможные недоразумения, торжественно заверяем читателя в том, что мы ничего не упрощали, во всяком случае в той части, которая касается принципа действия современных цифровых вычислительных машин. Цифровая вычислительная машина действительно не содержит ничего другого, кроме памяти и автомата, способного выполнять перечисленные выше операции. Если что и добавляется, так это устройства, позволяющие автоматически вводить исходные данные или извлекать результаты вычислений, но эти устройства не оказывают непосредственного влияния на процесс вычислений.

Конечно технически все выглядит иначе. Так, память вычислительной машины — это не ящик с карточками, а устройство, состоящее из очень большого числа крохотных сердечников, способных намагничиваться и сохранять состояние намагниченности. Ряд таких сердечников составляет ячейку. Количество времени, затрачиваемого на то, чтобы записать что-нибудь в ячейку или прочесть ее содержимое, составляет у современных цифровых вычислительных машин одну десятимиллионную долю секунды. За такое же количество времени выполняются и операции перехода по точному совпадению, пересылки и переадресации на единицу. Для того чтобы выполнить сложение двух девятизначных цифр по изложенным выше правилам, современной вычислительной машине потребовалось бы около

10 *мксек.* Вряд ли можно предположить, что даже самый опытный и тренированный человек — вычислитель сумеет сложить два девятизначных числа быстрее чем за 10 *сек.* Следовательно, цифровая вычислительная машина работает примерно в миллион раз быстрее человека. Это одно из обстоятельств, объясняющих чудеса, творимые современной вычислительной техникой.

Есть и второе важное обстоятельство. Дело в том, что процесс работы по правилам, подобный описанному выше, приведет к успеху в том и только в том случае, если все правила будут выполняться неукоснительно: ни одно из них не будет пропущено и при их выполнении не будут допущены ошибки. Здесь вычислительная машина также обладает несомненными преимуществами. Современные машины могут работать без единой ошибки примерно в течение месяца. Иными словами, одна ошибка допускается за

$$30 \times 24 \times 60 \times 60 \times 10\,000\,000 = 25\,920\,000\,000\,000$$

операций. Исследования показали, что поставленный в такие же условия специально натренированный человек делает одну ошибку в среднем на каждую тысячу операций. Значит, машина ошибается в 25 920 000 000 раз реже, чем человек.

Количество ячеек в памяти современных цифровых вычислительных машин достигает нескольких миллиардов. В этой части машины пока еще уступают человеку, объем памяти которого значительно больше. Однако по мере развития технологии разрыв между объемом памяти машины и объемом памяти человека все более сокращается.

И все же наиболее поразительным, на наш взгляд, является тот факт, что каковы бы ни были быстродействие, объем памяти и надежность, самая сложная и самая совершенная цифровая вычислительная машина есть не что иное, как память, т. е. тот же самый ящик с карточками, только более усовершенствованный, и автомат, выполняющий над содержимым ячеек памяти простейшие операции.

Если память машины пуста, то она не может делать ничего, даже складывать. Все, что может цифровая вычислительная машина, это выполнять программу, записанную в соответствующих ячейках ее памяти.

С каким ликованием прочтет эти строки тот, кто до сих пор убежден, что машина лишь слепой исполнитель программы, введенной в нее человеком. Но подождите радоваться. Из всего сказанного выше с очевидностью следует, что цифровая вычислительная машина способна решить любую задачу, если только процесс решения можно описать в форме алгоритма, т. е. последовательности правил, подобной описанной выше. Составление программы — задача, которая решается также по определенным правилам. Следовательно, нет никаких препятствий к тому, чтобы машина сама составляла для себя программу. Чтобы пояснить, как это делается, вернемся еще раз к описанному выше примеру.

Заметим, что правила, начиная с записанного на карточке номер 102 вплоть до карточки с номером 121, в одинаковой мере пригодны для сложения любой пары цифр, взятых из двух слагаемых. Назовем эту часть программы стандартной программой сложения двух цифр. Правила, записанные на карточках с номерами 100, 101 и 200, обеспечивают повторение стандартной программы сложения двух цифр столько раз, сколько это нужно, пока не будет завершена операция сложения двух чисел.

Разовьем теперь эту идею дальше. Предположим, что мы хотим научить машину умножать числа. Известно, что операцию умножения можно выполнять, как ряд последовательных сложений Следовательно, мы вправе рассматривать всю описанную нами программу как стандартную программу сложения на этот раз двух чисел. А чтобы научить машину умножать, достаточно добавить лишь несколько карточек, содержащих правила повторения стандартной программы сложения.

Но то, что получится после добавления этих карточек, это снова стандартная программа — программа умножения, а например, возведение в степень суть повторение операции умножения.

Подойдем теперь к тому же вопросу с несколько иных позиций. Перед началом работы в машине были карточки с записанными на них исходными данными задачи, в нашем примере это два числа. Но легко понять, что на карточках не обязательно писать цифры, можно писать все, что угодно, например слова, составленные из букв русского или латинского алфавита, или же какие-либо другие символы. Работа машины при этом никак не изменится, поскольку все, что делает машина, это выполнение операций сравнения. А операция сравнения будет выполнена также успешно, если на карточках, содержащих правила, будут записаны те же самые символы, что и на карточках с исходными данными. Сказанное в одинаковой степени справедливо и для настоящих вычислительных машин с памятью, состоящей из магнитных сердечников.

После выполнения программы появляются другие карточки с записанным на них результатом. Результат также не обязательно должен быть числовым, а может представлять собой последовательность любых символов, в том числе и букв, из которых составляются слова.

Рассуждая таким образом, мы можем сказать, что выполнение программы в цифровой вычислительной машине есть не что иное, как преобразование последовательности символов, представляющих собой исходные данные, в другую последовательность символов, представляющую собой результат. Заметим, что в общем случае результат может оказаться совсем не таким, которого мы ожидали

Предположим, что мы применяем какую-то программу к некоторым исходным данным и получаем некоторый результат, не обязательно правильный. Введем меру отклонения полученного результата от правильного. В качестве такой меры можно использовать, например, количество символов в полученном результате, которые не совпадают с символами правильного результата. Предположим, наконец, что в памяти машины уже имеется большое количество разных стандартных программ, оставшихся от ранее решенных задач

Рассмотрим теперь такую последовательность правил.

1. Применить к исходным данным некую стандартную программу (назовем ее программой *А*).

2. Определить меру отклонения полученного результата от правильного.

3. Изменить произвольным образом одно из правил программы *А*.

4. Снова применить измененную программу *А* к исходным данным, получить результат и определить меру отклонения нового результата от правильного.

5. Если новая мера отклонения оказалась меньше предыдущей, зафиксировать внесенное изменение и перейти к выполнению пунк-

та 3. Если новая мера оказалась больше предыдущей, восстановить измененное правило программы *А* в его первоначальном виде и перейти к выполнению пункта 3.

Написанное здесь снова представляет собой программу. Выполнение этой программы может привести или не привести к успеху. В первом случае задачу можно считать решенной, причем в результате ее решения получается новая программа, т. е. машина оказывается *обученной* делать го, чего она раньше не умела. Если же успех не достигнут, то же самое повторяется применительно к некоторой другой стандартной программе *Б* и т. д. Чем больше готовых стандартных программ уже имеется в памяти машины или, другими словами, чем выше ее интеллектуальный уровень, тем больше вероятность успеха. Именно таким образом современные вычислительные машины обучаются играть в шахматы, доказывать математические теоремы и многому другому. Описанная выше программа была составлена американскими учеными Саймоном, Ньюэлом и Шоу и названа ими Всеобщим решателем задач.

Машина, снабженная Всеобщим решателем задач или любой другой эквивалентной ему программой, а также имеющая в своей памяти достаточный запас готовых стандартных программ, практически не нуждается в каком-либо дополнительном программировании. Это все же не значит, что такая вычислительная машина может действовать совершенно самостоятельно. Для выполнения работы необходимо установить цель, с которой выполняется работа. Она может быть задана либо в виде конечного результата (именно такой случай имелся в виду, когда мы рассматривали последовательность действий Всеобщего решателя задач), либо в виде определенных требований, предъявляемых к конечному результату. Интересно здесь то, что подобные требования должны быть сформулированы исключительно точно, поскольку машина будет выполнять их неукоснительно и не добавит к ним никаких дополнительных ограничений. Хорошей иллюстрацией здесь может служить анекдот, уже более десяти лет бытующий в различных вариантах в среде специалистов по вычислительной технике.

Один чрезмерно полный человек решил похудеть. Для этого надо было садиться на диету, но ему не хотелось испытывать неизбежное при диете чувство голода. Решение своей проблемы он предоставил цифровой вычислительной машине, введя в нее данные о калорийности всех имеющихся в продаже продуктов и поставив ей целью рассчитать меню, которое при заданном количестве потребляемых в день калорий обеспечивало бы максимальный общий вес продуктов. Решение, полученное машиной, оказалось простым и лаконичным: 200 *л* уксуса в сутки.

Чтобы избежать подобных «уксусных» решений, в последние годы все более четко намечается тенденция к организации для общения человека с машиной так называемого режима диалога. В режиме диалога человек не формулирует задачу сам, он только отвечает на задаваемые машиной вопросы. Вопросы же строятся в такой форме, чтобы ответами на них, по возможности, могли служить только либо да, либо нет. Таким образом, удается, во всяком случае, гарантировать достаточную полноту исходных данных и избежать «уксусных» решений, которые, очевидно, могут появиться тогда, когда предусмотрены не все возможные результаты.

Подведем итоги сказанному. Цифровая вычислительная машина во всем ее современном великолепии есть не что иное, как пустой

ящик (с карточками), соединенный с примитивным автоматом. Пока память машины пуста, она совершенно беспомощна, гораздо беспомощнее новорожденного ребенка, который с первых часов своего существования умеет уже очень многое, например сосать, глотать и переваривать пищу. Обычно при выпуске с завода память машины загружают первоначальным набором стандартных программ, позволяющих ей выполнять арифметические операции, решать многие часто встречающиеся задачи, а также стандартных программ, организующих работу первичных программ.

Дальнейшие способности машины приобретаются в результате обучения на основе накопленного опыта. Пределы такому самосовершенствованию устанавливаются только объемом памяти и, конечно, условиями, в которых протекает работа машины. Если всю свою «жизнь» машина будет решать одну и ту же задачу, например рассчитывать заработную плату, то ничего, кроме квалифицированного бухгалтера, из нее не получится. Однако если ввести в машину, например, правила игры в шашки и объяснить, что такое выигрыш, т. е. сформулировать цель, то мало-помалу такая машина может достигнуть весьма заметных результатов. Так и случилось в 1962 г., когда машина, запрограммированная американцем Артуром Л. Сэмюэлем, обыграла в шашки чемпиона штата Коннектикут Роберта В. Нили Следовательно, в числе прочего машину можно обучить и играм, а это как раз то, что нам требуется.

Теперь мы имеем все основания составить еще одну модель автоматической системы управления. Такая модель показана на рис. 35. Располагая столь мощным средством, как цифровая вычислительная машина, мы можем представить себе теперь объект управления, значительно более сложный, чем это было до сих пор. Пусть таким объектом будет, например, завод, выпускающий много различных видов продукции. Выпуск продукции каждого отдельного вида регистрируется датчиком. Имеются также датчики, формирующие сведения о большом количестве других параметров, таких как количество имеющегося на складах и поставляемого сырья, количество поступающей к заводу энергии и т. п.

Данные от всех датчиков поступают в цифровую вычислительную машину. На основании этих данных, а также сообразуясь с заранее определенной целью, которая в нашем случае состоит в том, чтобы все виды продукции выпускались в строгом соответствии с планом и при минимальных затратах, машина разрабатывает стратегию управления и выдает сигналы, требующие применения тех или иных управляющих воздействий. Эти сигналы воспринимаются усилителями и передаются исполнительным механизмам.

Остается заметить, что введение цифровой вычислительной машины не изменило основной структуры системы управления. Снова мы имеем замкнутый контур с отрицательной обратной связью и снова система управления вводится в действие лишь тогда, когда в этом возникает необходимость, т. е. когда наблюдаются отклонения регулируемых параметров от предписанных значений. Изменились лишь количество регулируемых параметров и, конечно, сложность стратегии управления.

Познакомив читателя с основами систем автоматического управления и с принципом действия цифровых вычислительных машин, трудно обойти молчанием еще одно направление современной науки, само право которого на существование многими до сих пор ставится под сомнение. Это так называемый искусственный интеллект.

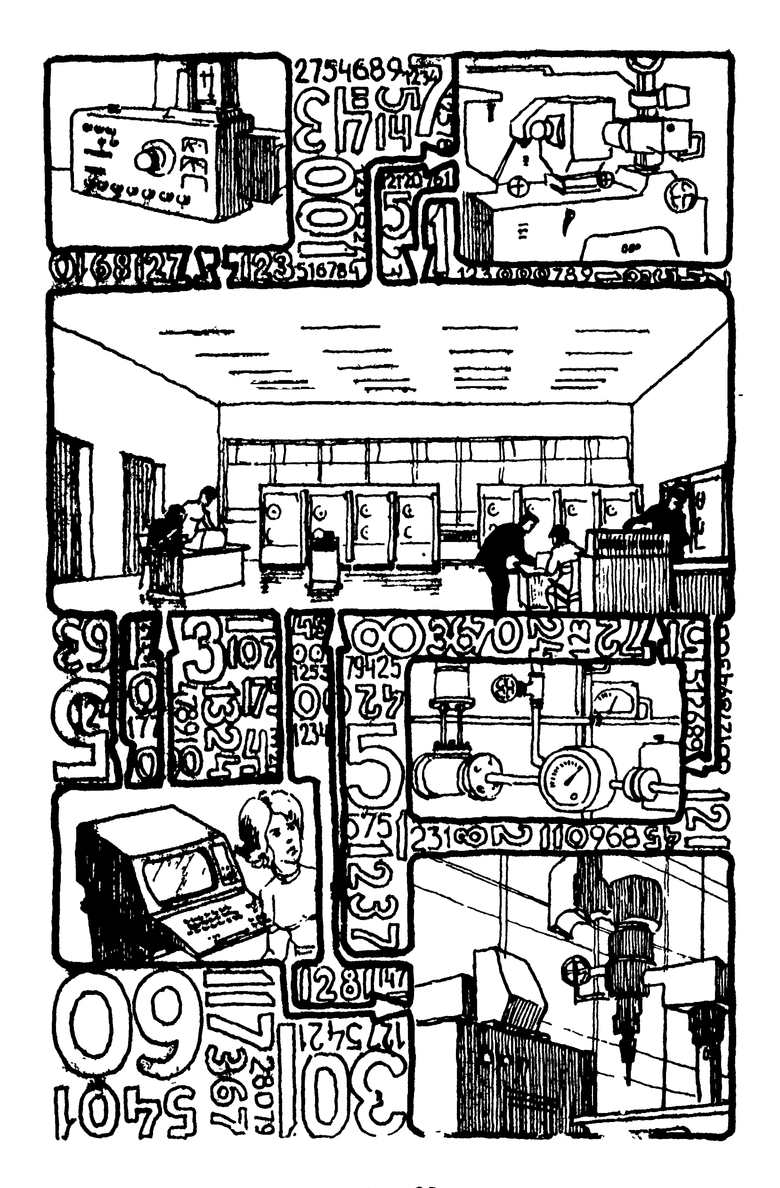


Рис. 35.

Под общим названием «искусственный интеллект» объединяется сейчас целый ряд научных исследований, так или иначе связанных с попытками моделирования различных аспектов умственной деятельности человека. При этом с самого начала выделились два принципиально различных подхода к проблеме. Первый подход, сторонники которого составляют сейчас подавляющее большинство, заключается в программировании электронных цифровых вычислительных машин. Программа составляется таким образом, чтобы достигаемая в результате работа машины внешне как можно ближе напоминала работу человеческого мозга при решении сходных задач.

Второй подход основывается на изучении структуры человеческого мозга или отдельных его частей и попытках моделирования техническими средствами самой этой структуры. Поскольку о тонкой структуре мозга нам сегодня практически еще ничего не известно, совершенно естественно, что как количество сторонников этого второго подхода, так и количество выполненных в этом направлении работ насчитывает единицы.

Чрезвычайно большой интерес представляет сама история возникновения и развития рассматриваемого направления. Большинство авторов по совершенно понятным соображениям связывает начало работ в области искусственного интеллекта с появлением в 40-х годах нашего века электронных цифровых вычислительных машин. Только наиболее радикально настроенные ученые, такие, например, как уже упоминавшиеся выше Ньюэлл, Саймон и Шоу, позволяют себе говорить о предыстории и даже о доисторическом периоде исследований искусственного разума. Однако даже доисторический период они относят всего лишь на десятилетия назад, имея в виду отдельные работы по моделированию процессов мышления средствами аналоговой вычислительной техники.

На самом деле начало работ в области искусственного интеллекта следует датировать значительно более ранними сроками. Еще Лейбницем были проделаны успешные опыты по созданию механизмов, моделирующих процессы построения высказываний на основании законов формальной логики. При желании можно было бы указать примеры и более ранних работ, однако этого не стоит делать, дабы избежать бесплодных споров. В то же время нам представляется совершенно очевидным, что отмеченные опыты Лейбница имеют, возможно, даже большее право быть причисленными к области искусственного интеллекта, чем некоторые современные исследования, связанные, например, с распознаванием образов.

Тот факт, что начало исследований искусственного интеллекта следует относить не на несколько десятилетий, а по меньшей мере, на 300 лет назад, имеет, на наш взгляд, чрезвычайно важное значение. Именно здесь кроется одно обстоятельство, во многом определившее пути развития исследований.

Разрабатывая теоретические основы кибернетики — науки, устанавливающей общность многих процессов, происходящих в живых организмах и искусственно создаваемых системах, Норберт Винер совершенно естественным образом пришел к заключению, что подобную общность следует усматривать во всем, включая также и процессы, объединяемые под названием «мышление». Винером была высказана даже мысль о возможном «бунте» машин, причем здесь имелись в виду не фантастические явления далекого будущего, а совершенно конкретные события, которые могут происходить в системах, характеризуемых высокой степенью автоматизации.

Подобные идеи Винера встретили яростное сопротивление большинства его современников. Поскольку наряду с этим нельзя было игнорировать явные успехи машин в таких, например, областях, как решение математических задач или управление артиллерийской стрельбой, и к тому же не было ни малейшей возможности отрицать тот факт, что во всяком случае решение математических задач — это процесс, безусловно относящийся к категории «мышление», то немедленно было предложено подразделять мыслительные процессы на «творческие» и «нетворческие». Как очень хорошо подметил один из ученых, к области разумного начали относить лишь то, чего не могут делать машины Подобное определение обладает тем несомненным преимуществом, что оно эволюционирует по мере развития техники.

Так или иначе, но область исследований, относящихся к классу искусственного интеллекта, резко сузилась. Это не значит, конечно, что были прекращены или хотя бы сокращены работы по таким естественным применениям цифровых вычислительных машин, как решение математических задач. Но в то же время стало традицией называть искусственным интеллектом только модели различных «творческих» процессов. Мы берем здесь слово «творческих» в кавычки потому, что на сегодня не существует никакого мало-мальски убедительного определения, позволяющего провести различие между процессами творческими и нетворческими. Одна из попыток дать подобное определение принадлежит профессору Стенфордского университета Джону Маккарти. «Можно сказать, — говорит Маккарти, — что машина имеет интеллект, если она способна делать такие вещи, что если бы их делал человек, то мы имели бы основание считать его умным». Следуя Маккарти, мы должны определить теперь, что такое умный человек, и проблема будет решена. Отложим пока обсуждение этого вопроса и заметим только, что согласно общепринятой концепции человек, способный решать в уме сложнейшие математические уравнения и не более того, ни в коей мере не должен считаться умным.

Попробуем теперь разобраться, что представляют собой опыты по созданию искусственного разума, начав со второго из отмеченных выше направлений. По полу лаборатории резво катается на колесиках маленькая металлическая тележка, внешне напоминающая черепаху. На первый взгляд движения тележки кажутся совершенно беспорядочными, но присмотревшись внимательнее, можно заметить много интересного. Например, натолкнувшись на препятствие, тележка резко сворачивает в сторону, огибает его и продолжает двигаться по свободному пространству.

С течением времени движения тележки становятся все более вялыми и вдруг ее поведение резко изменяется. Вместо того чтобы беспорядочно метаться по комнате, тележка устремляется к стене и на несколько минут застывает в неподвижности у штепсельной розетки. Затем все повторяется сначала.

Неподготовленный наблюдатель вправе прийти в восторг. Действительно, бездушный механизм чувствует препятствия и умеет их преодолевать. «Проголодавшись», он самостоятельно отыскивает кормушку (штепсельную розетку) и, подключившись к ней, насыщается (подзаряжает свои аккумуляторы). Иными словами, механизм ведет себя вполне разумно.

Уклонившись снова от обсуждения понятия «разум», укажем лишь, что для того, кто прочел предыдущие главы, в поведении че-

репашки нет ничего таинственного. В передней части тележки установлен бампер, при нажатии на который замыкается контакт. Контакт включает миниатюрный электрический моторчик, поворачивающий передние колеса. Когда контакт разомкнется, колеса поворачиваются в прежнее положение. При уменьшении напряжения аккумулятора ниже установленного предела включается чуть более сложная система управления, содержащая программу подключения к розетке.

Все это мы уже разбирали выше на большом количестве примеров, и пока такая черепашка при всей своей похожести на живое существо оказывается ничуть не сложнее швейной машины. Но вот еще один эксперимент. Экспериментатор наблюдает за черепашкой со свистком во рту и свистит каждый раз, когда черепашка наталкивается на препятствие. Проделав так несколько раз подряд, экспериментатор свистит, хотя никакого препятствия на пути черепашки нет, и — о чудо! — черепашка послушно поворачивает и катится в другом направлении. Она научилась реагировать на свисток. Установился условный рефлекс, правда, не надолго. Уже через какую-нибудь минуту черепашка перестает обращать внимание на свистки, и процесс обучения нужно начинать сначала. Моделирование условных рефлексов, моделирование процессов самообучения — это уже не работа по заданной программе.

Как же достигается такая способность черепашек? Было испробовано множество различных способов создавать самообучающиеся системы. Мы не будем описывать ни один из них, а построим свой собственный прибор, используя при этом опыт, полученный в предыдущих главах. Схема такого прибора показана на рис. 36. Главную роль в этом приборе играет та самая биметаллическая пластинка с обмоткой-подогревателем, которой мы с таким успехом пользовались в главе второй. Но начнем по порядку.

При нажатии на бампер *Б* замыкается контакт *К*. От положительного полюса аккумуляторной батареи электрический ток, проходя через замкнутый контакт *К*, поступает в двигатель *Д* рулевого управления. Через обмотки двигателя цепь тока замыкается на отрицательный полюс аккумулятора. Именно так работает черепашка, лишенная условного рефлекса.

Кроме того, при замыкании контакта *К* электрический ток от положительного полюса аккумуляторной батареи проходит также через обмотку реле $Р_2$ и возвращается к отрицательному полюсу аккумулятора. В результате замыкается контакт $К_{21}$ реле $Р_2$, но, как легко убедиться, внимательно рассмотрев схему, замыкание одного только контакта $К_{21}$ не влечет за собой никаких дополнительных действий.

В состав прибора входит также микрофон *М*. Когда раздается сильный звук, на выходе микрофона образуется электрическое напряжение. Это напряжение усиливается усилителем *У* (опять усилитель, на этот раз, по всей вероятности, выполненный на транзисторах) и вызывает прохождение электрического тока через обмотку реле $Р_1$. В результате замыкаются сразу два контакта — $К_{11}$ и $К_{12}$, но, как легко убедиться, замыкание этих контактов опять-таки не вызывает никаких дальнейших действий. Заметим для определенности, что в положении, изображенном на рисунке, контакт, связанный с биметаллической пластинкой, разомкнут.

Совсем иначе будет обстоять дело, если сильный звук (свисток) раздастся в тот самый момент, когда будет нажат и бампер *Б*. В этом случае одновременно замкнутся оба контакта — $К_{11}$ и $К_{21}$.

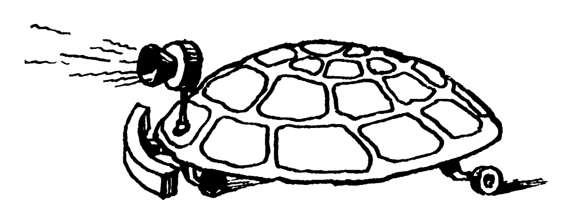


Рис. 36.

Электрический ток от положительного полюса аккумуляторной батареи пройдет сначала через контакт K_{11}, потом через контакт K_{21} и, пройдя по обмотке-нагревателю биметаллической пластины, замкнется на отрицательный полюс аккумулятора. Контакты K_{11} и K_{21} остаются замкнутыми все время, пока свистит свисток и прижат бампер, и все это время биметаллическая пластина будет нагреваться. За один раз она нагреется не так уж сильно, но если совпадение свистка и нажатия на бампер будет повторяться много раз, пластина, наконец, нагреется настолько, что, изогнувшись, замкнет контакт, расположенный на ее конце. Если теперь не трогать

бампер, а издать только громкий звук, реле P_1 замкнет контакт K_{12} и по цепи от положительного полюса аккумуляторной батареи через контакт K_{12} и контакт биметаллической пластинки ток попадет в обмотки двигателя *Д*. Колеса повернутся. Черепашка научилась слушаться свистка. Через некоторое время биметаллическая пластина остынет, ее контакт разомкнется и все придется начинать сначала.

Укажем теперь на одно очень важное обстоятельство. Биметаллическая пластина изгибается на нужную величину, достаточную для замыкания контактов, после нескольких импульсов тока, протекающих по ее обмотке-нагревателю. Иными словами, здесь наблюдается то же самое явление, которое мы рассматривали в главе второй в связи с датчиками и конструкцией нервной клетки, а именно явление порога срабатывания. Только после воздействия определенной силы (в нашем случае величина этой «силы» измеряется количеством импульсов тока) достигается тот или иной эффект. Оказывается, биметаллическая пластина, кроме многих полезных свойств, обнаруженных выше, позволяет также строить устройства, обладающие порогом срабатывания. Порогом срабатывания обладают и нервные клетки, что является одним из весьма важных их свойств. Многочисленные конструкторы строили своих черепашек совсем не для того, чтобы поражать воображение простаков, слабо разбирающихся в технике. Целью всех подобных экспериментов было доказать, что столь на первый взгляд сложный процесс, как обучение, можно воспроизвести, располагая лишь сравнительно простыми элементами, единственным требованием к которым является наличие порога срабатывания, будь-то нервная клетка или биметаллическая пластинка.

Некоторым из наших читателей может показаться, что слово «обучение» мы используем здесь без достаточных оснований. Чтобы развеять сомнения, рассмотрим конструкцию еще одного прибора, названного персептроном. Однако предварительно бросим еще один прощальный взгляд на рис. 36. Сделаем это для того, чтобы убедиться, что, меняя положение контакта, связанного с биметаллической пластиной, можно изменять величину порога срабатывания. Действительно, чем меньше величина зазора между контактом и пластиной, тем меньше должна изогнуться пластина, тем меньшее количество импульсов тока потребуется для замыкания контакта. Наоборот, отдаляя контакт от пластины, можно увеличивать порог срабатывания. В дальнейшем нам будет безразлично, пользуемся мы биметаллической пластиной или каким-либо другим, может быть, менее понятным, но более простым с точки зрения современной технологии устройством. Важно лишь то, что мы располагаем элементом, обладающим порогом срабатывания, и знаем, что при желании этот порог срабатывания можно делать либо больше, либо меньше. Теперь мы полностью подготовлены для конструирования персептрона.

Персептрон — это машина для распознавания образов. О тонкой структуре человеческого мозга мы знаем пока чрезвычайно мало. Поэтому в основу конструкции персептрона, которая представляла собой попытку построить модель подобной структуры, были положены два ведущих соображения. Первое из них состояло в том, что мозг является совокупностью отдельных клеток, способных воспринимать и передавать возбуждение. Второе соображение сводилось к тому, что связи между отдельными клетками организуются

некоторым случайным образом и в дальнейшем могут изменяться (совершенствоваться) на основе процесса обучения, т. е. последовательности актов «поощрения» и «наказания».

Эти две основные идеи нашли свое воплощение в конструкции прибора, схематически показанной на рис. 37. Персептрон состоит из трех основных частей. Первая часть, помеченная на рисунке буквой *A*, представляет собой прямоугольное табло, состоящее из большого количества (обычно больше 100) чувствительных органов, чаще всего фотоэлементов. Каждый чувствительный орган имеет самостоятельный вывод, на котором действует электрическое напряжение, пропорциональное интенсивности возбуждения. Если чувствительный орган — это фотоэлемент, то напряжение на его выводе пропорционально освещенности. Выводы от всех чувствительных органов соединяются с частью *B*.

В части *B* прибора подсоединенные к ней выводы части *A* переплетаются и комбинируются между собой некоторым случайным образом. Часть *B* состоит из большого количества элементов, называемых обычно ассоциативными. Каждый ассоциативный элемент может находиться либо в возбужденном, либо в невозбужденном состоянии, причем переход ассоциативного элемента из невозбужденного состояния в возбужденное происходит в том случае, когда сумма сигналов, поступивших на вход этого элемента, превышает некоторый заданный уровень, называемый порогом. Сигналами, поступающими на входы ассоциативных элементов, могут быть либо выходные сигналы (электрические напряжения) чувствительных органов части *A*, либо выходные сигналы других ассоциативных элементов.

Каждый ассоциативный элемент имеет выход, на котором также действует сигнал (электрическое напряжение). Выходы всех или определенной части ассоциативных элементов соединяются с частью *C*. Часть *C* также состоит из отдельных элементов, называемых реагирующими. Принцип действия реагирующих элементов в основ-

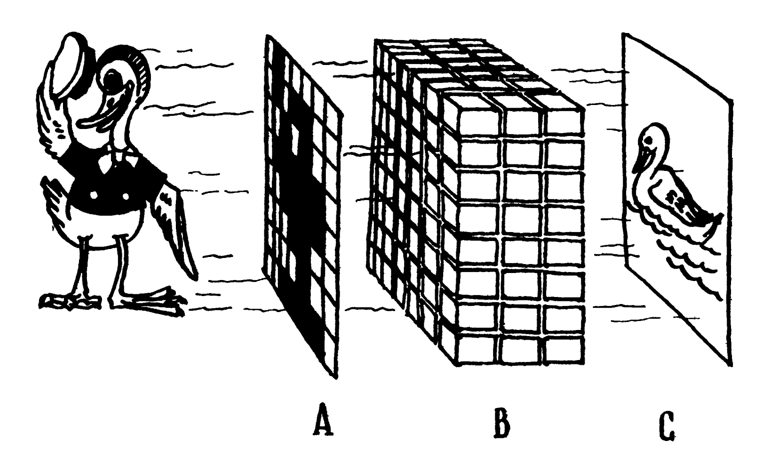


Рис. 37.

ном тот же, что и ассоциативных. Единственное отличие состоит в том, что выходы ассоциативных элементов соединяются со входами реагирующих элементов не случайно, а в некотором определенном порядке. Количество выходов реагирующих элементов также строго определено заранее и в точности соответствует количеству выбранных заранее классов распознаваемых объектов.

Пороги срабатывания ассоциативных элементов, а также в отдельных случаях и порядок соединения входов ассоциативных элементов с выходами чувствительных органов не являются постоянными, но могут изменяться под воздействием внешних сигналов, имеющих смысл поощрения и наказания. Обычно это осуществляется путем нажатия одной из двух кнопок. При нажатии кнопки поощрения существующие в части *B* связи и величины порогов закрепляются; при нажатии кнопки наказания величины порогов изменяются, а порядок связей (если это предусмотрено конструкцией) нарушается и заменяется другим.

Работа персептрона в свою очередь разделяется на две стадии: обучение и собственно работа. Для обучения заранее выбирается группа объектов, каждый из которых рассматривается как типичный представитель некоторого наперед установленного класса. Один из объектов этой группы «предъявляется» персептрону, и манипулируя кнопками поощрения и наказания, добиваются такого положения, чтобы на заданном выходе части *C* возникал сигнал. Затем персептрону предъявляется следующий объект и т. д. Процесс повторяется много раз, поскольку при обучении распознаванию некоторого данного объекта может нарушиться уже установившаяся реакция на предыдущий объект. При удачном стечении обстоятельств персептрон оказывается способным распознавать не только объекты-представители, но и другие объекты, относящиеся к тем же классам, например одинаковые цифры или буквы, написанные по-разному или отпечатанные различными шрифтами.

Сказанное позволяет нам определить функции каждой из частей персептрона. Часть *A* в ответ на предъявление ей образа объекта (если чувствительные органы суть фотоэлементы, то предъявление сводится к проектированию изображения объекта на табло) вырабатывает совокупность электрических сигналов, которые можно назвать также первичными признаками. Каждому конкретному объекту соответствует своя характерная для него комбинация первичных признаков. Часть *B* в ответ на поступившую на входы ассоциативных элементов комбинацию первичных признаков вырабатывает свою комбинацию сигналов, которые можно назвать также вторичными признаками. Если комбинация первичных признаков зависит только от объекта, то комбинация вторичных признаков определяется как образом объекта, так и всем предшествующим процессом обучения. Часть *C* преобразует комбинации вторичных признаков в сигналы, указывающие на принадлежность данного объекта данному классу.

Мы столь подробно остановились на конструкции персептрона по той причине, что основные изложенные здесь идеи находят свое отражение во многих других моделях искусственного интеллекта. Каковы же результаты опытов с персептроном? Один из наиболее показательных экспериментов состоял в том, что в качестве образов, подлежащих распознаванию, персептрону предъявлялись географические карты с нанесенными на них линиями равного давления — изобарами. Цель обучения состояла в том, чтобы предсказать

погоду в заданной области земного шара. После достаточно длительного обучения, а также ряда усовершенствований, внесенных как в конструкцию персептрона, так и в методику эксперимента, были получены прогнозы, сравнимые по достоверности с прогнозами, сделанными специалистом-синоптиком. А ведь предсказание погоды на основе карт с нанесенными на них изобарами — это однообразная работа, ежедневно выполняемая во всем мире десятками тысяч синоптиков, которые, очевидно, приобретают огромный опыт, повторяя изо дня в день одни и те же операции.

Весьма показательно, что столь впечатляющий результат не вызвал особых восторгов в среде специалистов по искусственному интеллекту. Многие авторы скорее склонны обвинять персептрон в том, что, будучи обучен отличать горизонтальные прямоугольники от вертикальных, он все же подчас путает круг с квадратом. Однако мы еще некоторое время воздержимся от выводов и перейдем пока к краткому обзору исследований, реализующих первый из отмеченных в начале главы подходов. В своем подавляющем большинстве эти исследования группируются вокруг таких направлений:

1) обучение машин различным играм и прежде всего игре в шахматы и шашки;

2) доказательство математических теорем;

3) организация «диалогов», в процессе которых машина распознает смысл заданного вопроса и, если это оказывается возможным, формулирует правильный, осмысленный ответ;

4) распознавание образов;

5) переводы с одного языка на другой;

6) сочинение стихов и музыкальных произведений.

Именно эти области деятельности по неким таинственным для нас соображениям принято относить к категорий творческих.

К сожалению, ограниченный объем главы не позволяет нам хотя бы кратко описать используемые здесь конкретные приемы. Поэтому мы рассмотрим лишь те методы, которые в большей или меньшей степени оказываются общими для всех перечисленных задач.

Первая характерная особенность, которая определяет сам методологический подход, состоит в том, что для построения каждой модели не привлекаются какие-либо специальные технические средства. Модель во всех случаях представляет собой программу, реализуемую на цифровой вычислительной машине широкого назначения.

Хорошим примером таких программ может служить упоминавшаяся выше программа Всеобщего решателя задач. В начале этой главы мы изложили основные идеи американских ученых в несколько измененном виде применительно к рассматривавшейся там проблеме. Теперь же можно описать программу Всеобщего решателя задач именно так, как она была описана самими авторами.

Программа оперирует с четырьмя основными понятиями. Это понятия *объекта, различия, оператора* и *цели*. Понятие объекта достаточно широко. Оно включает в себя сделанное на некотором языке описание всякой конкретной ситуации, причем в число таких ситуаций могут входить как начальные (условия задачи, исходное расположение шахматных фигур на доске), так и промежуточные или же окончательные. Окончательная ситуация, как правило, представляет собой ожидаемый результат работы, т. е., напри-

мер, выигрышную позицию на шахматной доске, сформулированное доказательство теоремы или законченное музыкальное произведение.

Понятие *различие* всегда предусматривает задание некоторой количественной меры, указывающей степень различия между какими-либо двумя объектами. Понятие *оператор* объединяет в себе любые средства, позволяющие преобразовать объект a в некоторый другой объект b.

Наиболее конкретным является понятие цели. Во Всеобщем решателе задач определены цели трех различных типов:

1) цели преобразования, состоящие в том, чтобы преобразовать объект a в объект b;

2) цели сокращения различия, состоящие в том, чтобы полностью уничтожить или уменьшить различие между объектами;

3) цели применения операторов, состоящие в том, чтобы применить данный оператор к некоторому объекту.

Соответственно трем видам целей имеется три различных вида процедур.

1. Процедура преобразования объекта a в объект b:

а) установи, в чем заключается различие d между объектами a и b;

б) задайся целью уменьшить это различие;

в) попытайся достичь этой новой цели;

г) если тебе сопутствует успех, находи новое различие и повторяй все сначала.

2. Процедура сокращения различия между объектами a и b:

а) обратись к оператору q, который может действовать в условиях различий данного вида;

б) задайся целью применить оператор q к объекту a;

в) попытайся достичь этой новой цели;

г) если тебе сопутствует успех, начинай все сначала, т. е. применяй процедуру 1.

3. Процедура применения оператора q к объекту a:

а) сравни условия применения оператора со свойствами объекта a;

б) если эти условия не удовлетворяются, задайся новой целью преобразования объекта a в объект, удовлетворяющий условиям, и попытайся достичь этой цели,

в) если условия удовлетворяются, применяй оператор q к объекту a, а затем возвращайся к процедуре 2 и постарайся установить и уменьшить различия между объектом b и новым, только что полученным объектом a'.

Отметим прежде всего существенное сходство только что описанных процедур с работой персептрона. Персептрон также имеет дело с объектами. Роль их играют описания распознаваемого образа (начальная ситуация) и промежуточных ситуаций, в качестве которых выступают комбинации сигналов на выходах ассоциативных элементов. Каждый раз персептрон преобразует начальный объект в один из возможных промежуточных объектов. При этом фиксируются различия, которые и служат основанием для поощрения или наказания. Наконец, целью работы персептрона является преобразование заданного начального объекта в конечный объект, представляющий собой признак класса объектов.

Легко проследить, что сходные процедуры используются, например, в процессе игры в шахматы. Здесь каждый раз игрок имеет

дело с объектом, представляющим собой описание позиции на доске. Операторы преобразования суть различные ходы. Цель — достигнуть выигрышной позиции.

Весьма существенное значение при реализации моделей искусственного интеллекта имеют способ организации описанных процедур и привлекаемая при выборе такого способа степень формализации. Для того чтобы сказанное стало более понятным, заметим, что, описывая каждую из трех процедур, мы использовали слово «попытайся». Это было необходимо по той причине, что, выполняя последовательность действий, предписанную процедурами, мы каждый раз неизбежно сталкиваемся с проблемой выбора. В случае игры в шахматы — это выбор одного из некоторого множества различных ходов, в случае персептрона — выбор того ассоциативного элемента, порог которого будет изменен, и т. п. Проблема выбора сама по себе может решаться различными способами. Для подавляющего большинства ситуаций можно представить себе, во всяком случае теоретически, систему правил, однозначно определяющих выбор в каждой конкретной ситуации. Такая система правил называется *алгоритмом*. Если она существует и используется в действительности, сам способ организации принято называть *алгоритмическим*. Если же такой системы правил не существует, выбор совершается либо чисто случайным образом, либо на основе каких-то косвенных указаний. В случае шахмат, например, среди многих возможных ходов может быть испытан тот, который ранее привел к выигрышу в сходной ситуации. В подобных случаях способ организации программ принято называть *эвристическим программированием*. Некоторые авторы склонны даже отождествлять понятия эвристического программирования и искусственного интеллекта.

Каковы же результаты, достигнутые на пути создания программных моделей искусственного интеллекта? Сильнейшие шахматные программы в дебюте и в начале миттельшпиля играют приблизительно в силу третьего разряда, но значительно слабее в эндшпиле. Программа игры в шашки не уступает сильнейшему противнику. Добавим только, что, вероятно, можно придумать такие игры, в которых машина, вне всяких сомнений, будет оставлять человека далеко позади.

Менее чем за девять минут с помощью программы, составленной для вычислительной машины ИБМ 704, были доказаны все 350 теорем из известной книги Рассела «Principia mathematica». Здесь интересно отметить также, что в процессе доказательства новых теорем машина использовала теоремы, доказанные ранее ею самою.

О распознавании образов говорилось уже достаточно много, добавим только, что, по мнению ряда ведущих специалистов, современные машины не только способны распознавать заболевание на основе предъявленных им перечней симптомов, но и в ряде случаев превосходят при этом опытных врачей-диагностов.

Перевод с одного языка на другой, по общему признанию специалистов, является одним из наиболее слабых мест искусственного интеллекта. Многочисленные опубликованные примеры показывают, что в этой области машины достигли лишь уровня студента первого курса технического вуза. Наконец, знаменитая «Иллиак сюита», написанная машиной для струнного квартета, может быть, и не вызывает особых восторгов, но звучит вполне «по-человечески». Во всяком случае, во время шуточного эксперимента, поставленного одним из авторов, среди двух десятков человек прослушавших «Иллиак

сюиту», в число которых входили и специалисты-музыковеды, ни один не заподозрил подвоха.

Иными словами, «во внеслужебное время» машина ведет себя, как человек средних, а в некоторых случаях даже выше средних способностей. Она может узнать вас в лицо, поболтать с вами о футболе, сыграть в шахматы или в шашки, причем в шашки наверняка обыграет, поговорить на не очень правильном, но вполне понятном иностранном языке и экспромтом сложить четверостишье. Казалось бы, отсюда следует вполне естественный вывод: умственная деятельность человека допускает моделирование и сейчас весь вопрос в том, какие именно стороны этой деятельности нужно моделировать в первую очередь, чтобы принести наибольшую пользу. Примерно подобный вывод и делают специалисты. В частности, именно благодаря такому выводу работы в области искусственного интеллекта разбились сейчас на ряд самостоятельных направлений. Работы по машинному переводу привели к бурному развитию математической лингвистики, наиболее плодотворными приложениями которой являются создание специальных машинных языков и трансляторов с этих языков, дешифровка неизвестных текстов, а также весьма интересные работы по математическому анализу литературных произведений.

Работы в области распознавания образов также имеют ряд плодотворных приложений, среди которых в первую очередь нужно отметить машинную диагностику и всевозможные задачи идентификации. Опыты по организации диалогов с машиной побудили развитие одного специального направления в математике, так называемой алгебры бинарных отношений. Практическим приложением этих работ является создание специальных программ, позволяющих человеку объяснить свою задачу машине даже в том случае, если у него нет специальной подготовки в области программирования.

Однако, несмотря на целый ряд достигнутых в последние годы серьезных успехов, работы в области моделирования разумной деятельности переживают сейчас своеобразный кризис. Один из признаков этого кризиса в том и состоит, что исследования, которые еще десять лет тому назад велись единым фронтом и имели перед собой одну достаточно общую цель, разбились на ряд более мелких и подчас даже мало связанных между собой направлений. Поводом к этому послужили соображения методологического характера.

Сейчас еще трудно до конца проанализировать причины такого кризиса, а следовательно, и наметить пути его преодоления. По всей вероятности, наибольший вред принесло первоначальное деление задач на творческие и нетворческие или, выражаясь более современным языком, на алгоритмизируемые и неалгоритмизируемые. Именно в результате такого деления внимание специалистов, работающих в области искусственного интеллекта, оказалось сконцентрированным на неалгоритмизируемых задачах. При этом, например, из того обстоятельства, что до сих пор не удалось создать шахматную программу, играющую в силу международного гроссмейстера, делается вывод о принципиальной невозможности моделирования творческих процессов. Иными словами, сегодня, как и четверть века тому назад, мы исходим из той основной концепции, что машина не может мыслить.

В этой связи имеет смысл вернуться сейчас к определению искусственного интеллекта, данному Джоном Маккарти. Что же должен делать человек для того, чтобы мы могли считать его умным? Один из знакомых авторов, ныне покойный, египтолог — ученый

с мировым именем, член-корреспондент АН СССР, во всем, что не касалось его специальности, проявлял полнейшую интеллектуальную беспомощность. До конца своих дней он называл трамвай конкой и всегда носил в кармане записку с собственным адресом, без которой он просто не мог добраться домой. Известно также, что относительно сильный шахматист может в то же время оказаться человеком с весьма средними умственными способностями. Наконец, широко используемые на западе тесты, на основании которых определяется коэффициент интеллектуальности (*IQ*), в основе своей достаточно примитивны, и если применить эти тесты к машине, конечно, соответствующим образом запрограммированной, то машина заведомо получила бы высший балл.

Количество подобных примеров можно умножать до бесконечности. Единственный правильный вывод из них состоит в том, что в настоящее время мы просто не в состоянии определить понятне «умный» со степенью определенности, достаточной для того, чтобы затем можно было распространять это понятие на искусственно создаваемые модели. А коли так, то сама постановка вопроса: может ли машина мыслить? — попросту не имеет смысла. Перед тем как задавать такой вопрос, мы должны сначала строго определить понятие «мыслить», а такого определения, за исключением цитированного выше «мыслить, значит делать то, чего не может машина», пока не существует.

Все было бы очень просто, если бы сама проблема являлась чисто терминологической. Тогда можно было бы, ничтоже сумняшеся, воздать человеку человечье, а машине машинное и продолжать работы по моделированию разумной деятельности, назвав их для приличия каким-нибудь другим термином.

Но, к сожалению, дело обстоит гораздо сложнее. Общая концепцня об ограниченности возможностей машинного моделирования приводит к тому, что работами в области искусственного интеллекта занимаются сейчас почти исключительно программисты. Вполне естественно, что они пользуются свойственными им приемами работы и прежде всего стремлением к математической строгости и стремлением обязательно формализовать задачу перед тем, как приступать к ее решению. За этим следует обязательное свéдение условий задачи к системе правил и количественных оценок. А суть дела состоит как раз в том, что далеко не все мыслительные процессы, в том числе и достаточно примитивные, в основе своей являются формальными или хотя бы формализуемыми.

Поясним сказанное следующими примерами. Из числа фигур, изображенных на рис. 38, человек наверняка определит фигуру *б* как восьмерку, а фигуру *г* как нуль (если, конечно, заранее известно, что все этн фигуры суть цифры). В то же время машина, работающая по любому из современных методов распознавания образов, с большой степенью вероятности определит фнгуру *б* как нуль, а фнгуру *г* либо как восьмерку, либо вообще воздержится от распознавания. Или другой пример. В ответ на просьбу провести на рис. 39 вертнкальную линию большинство из опрошенных укажут линию *AB*, в то вре-

Рис. 38.

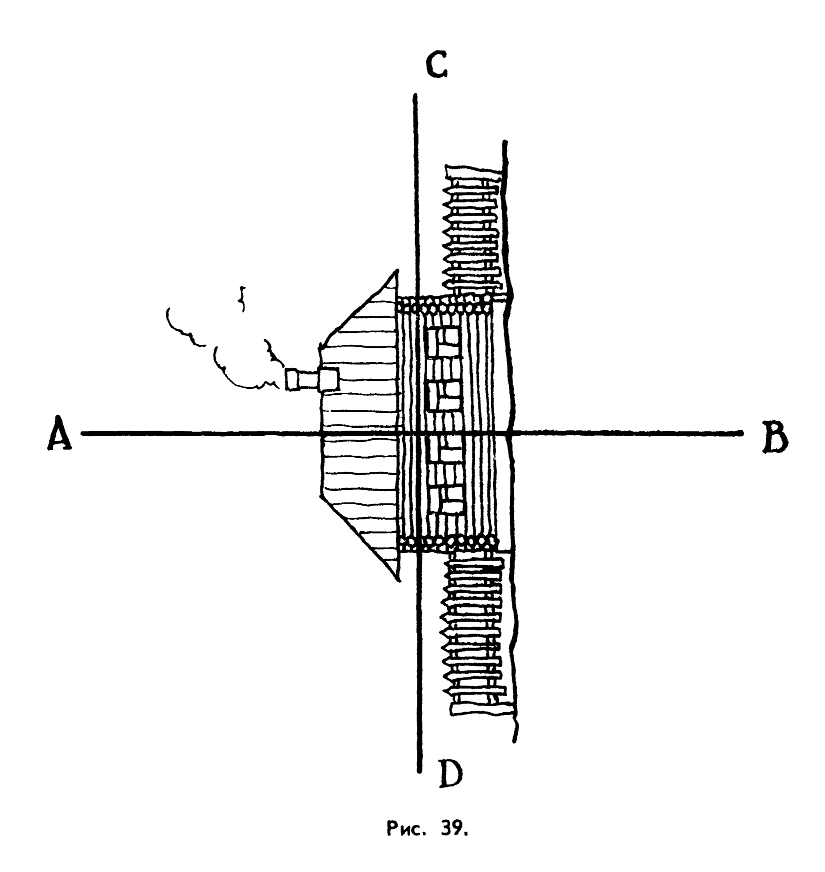


Рис. 39.

мя как машина, основываясь на системе формальных правил, конечно, всегда будет выбирать линию *CD*. Два перевода одного и того же литературного произведения, сделанные двумя различными переводчиками, могут одинаково хорошо передавать сущность оригинала и притом формально сколь угодно сильно отличаться друг от друга.

Все это означает, что многие мыслительные процессы в основе своей не формализуемы, во всяком случае в общепринятом смысле этого слова. Однако отсюда отнюдь не следует, что неформализуемый процесс не может быть воспроизведен в машине. Нужны просто другие методы, которые в противоположность строгим математическим методам можно назвать интуитивными. В зачаточном состоянии такие методы уже существуют, например программа игры в шашки предусматривает выбор очередного хода на основе вычисления количественных оценок различных позиций. Но наряду с этим та же программа предусматривает сравнение возникающих на доске позиций с позициями, которые имели место в ранее сыгранных машиной партиях, и может быть выбран тот самый ход, который при-

вел к выигрышу в сходных условиях в одной из предыдущих партий. При доказательстве теорем также допускается возможность использовать ход рассуждений, уже проведенных ранее при доказательстве другой теоремы. Обобщая, можно назвать подобные приемы *ассоциативным мышлением* или мышлением по аналогиям.

Реализация ассоциативных приемов во многом затрудняется формальным характером самих программ, а также языков, используемых для описания ситуации. Вообще есть много оснований полагать, что проблема создания подходящего языка представляет собой в настоящее время ключ к дальнейшему развитию работ в области искусственного интеллекта.

Математические методы широко внедряются сейчас в биологию, психологию, лингвистику. Это, несомненно, приносит большую пользу, однако для дальнейшего развития работ по моделированию разумной деятельности не менее важен, по всей вероятности, и обратный процесс, связанный с использованием при моделировании методов классической психологии или языкознания.

Рассмотрим, например, в общих чертах процесс машинного перевода. Большинство существующих программ предусматривает перевод фраза за фразой. После того как выбрана очередная фраза, в словаре отыскиваются эквиваленты всех слов, ее составляющих. Если эквивалентов для некоторого слова оказывается несколько, то они выписываются все. Затем «по контексту» отбирается наиболее подходящий эквивалент. На заключительном этапе составляется фраза перевода из отобранных слов с привлечением правил грамматики.

В качестве альтернативы к такому «строгому» методу можно предложить следующий полуфантастический прием. Пусть машина анализирует текст оригинала до тех пор, пока не станет ясно, что речь идет, например, об описании заката солнца. Затем из памяти извлекаются заранее помещенные туда, возможно, при выполнении предыдущих работ, варианты описания солнечного заката. Из них отбирается тот, который ближе всего совпадает с оригиналом. Затем выбранный вариант «доводится», например, путем замены эпитетов. Отличие этого приема от предыдущего состоит в том, что словарь (формальный прием) привлекается не на начальном, а на завершающем этапе работы.

Возвращаясь к вопросам методологии, можно сказать, что, по всей вероятности, было бы правильно отнести к разряду разумной деятельности любую деятельность, связанную с переработкой информации. И дело здесь опять-таки не в терминологии. Подобный взгляд попросту позволил бы создать принципиально иную основу для классификации проблем искусственного интеллекта. Появилась бы возможность подразделять задачи не на творческие и нетворческие, а по степени их сложности, понимая в данном случае под сложностью глубину привлекаемых ассоциативных связей. Что же касается методов моделирования, то в пределах каждого класса такие методы должны представлять собой разумное сочетание формальных и интуитивных приемов Необходимость в подобной или сходной с ней концепции как средстве для нового объединения усилий специалистов, работающих в области искусственного интеллекта, остро ощущается в настоящее время.



Говорят, что первую половину пути путешественник всегда думает о том, что он оставил, а вторую половину пути — о том, что его ждет впереди. Если применить подобный афоризм к авторам этой книги, то придется сравнить их с путешественниками, совершающими кругосветное путешествие. Чем меньше страниц остается до конца книги, тем острее чувствуется необходимость вернуться к вопросам, поставленным в самом начале.

В предисловии мы определили кибернетику, как науку о том,

ПО КАКОМУ МЕСТУ НАДО СТУЧАТЬ МОЛОТКОМ

(ГЛАВА ВОСЬМАЯ)

Ответили ли мы на этот вопрос? В предыдущих главах были рассмотрены всевозможные автоматические системы. Попутно нам удалось ответить на целый ряд вопросов, в частности, когда нужно подавать управляющее воздействие и какой вид должно

иметь это воздействие. Единственный вопрос, который так ни разу и не возник на предыдущих страницах, это где или, более правильно, к какой именно точке системы управляющее воздействие должно быть приложено. Рассматривая возможные конструкции регулятора паровой машины, мы предполагали, что управлять скоростью этой машины можно и нужно одним-единственным способом — поворачивая заслонку в трубе, подводящей пар в цилиндр. Так ли это на самом деле? И действительно ли вопрос о точке приложения управляющих воздействий всегда решается так же просто, как в случае паровой машины?

На первый взгляд кажется, что так оно и есть. Чтобы изменить направление движения автомобиля, надо повернуть баранку, а чтобы увеличить его скорость — нажать на акселератор. Чтобы заставить сокращаться мышцу лягушачьей лапки, надо приложить электрическое напряжение к спинному нерву. Наконец, чтобы убить мамонта, надо приложить воздействие к шесту, поддерживающему камень. Правда, того же эффекта можно было бы добиться, постукивая другим камнем по основанию скалы, но вряд ли такой способ мог прийти в голову конструктору ловушки для мамонта и его последователям.

Ясно одно — во всех рассмотренных в этой книге примерах вопрос о точке приложения управляющего воздействия представляется исключительно простым. Но это простота кажущаяся. Объясняется она тем, что, во-первых, мы сознательно рассматривали системы, уже приспособленные для управления, т. е. автомобиль, снабженный сложной системой рычагов, передающих движение от рулевой баранки к передним колесам, паровую машину с заслонкой в паропроводящей трубе и т. п. Во-вторых, и это значительно важнее, мы ни разу не поставили вопроса об эффективности управления.

Вернемся еще раз к паровой машине. Предположим, что нагрузка упала до минимума и чтобы поддерживать нужное значение скорости вращения вала, нам пришлось почти полностью прикрыть заслонку. Рассматривая подобную ситуацию в пятой главе, мы предполагали, что давление пара остается постоянным. Но прикрывая заслонку, мы уменьшаем расход пара. Если топка котла продолжает работать с прежней интенсивностью, то единственная возможность поддерживать давление пара постоянным состоит в том, чтобы выпускать излишек пара через предохранительный клапан котла. Так и делается на самом деле. Но спрашивается, что в этом хорошего? Ведь драгоценное топливо затрачивается теперь в прямом смысле этого слова на ветер.

Как же избежать подобной непроизводительной затраты топлива при уменьшении нагрузки тепловой электростанции? Казалось бы, сделать это достаточно просто, если соединить рычаг центробежного регулятора не с заслонкой в пароподводящей трубе, а с такой же точно заслонкой в трубе, подводящей нефть к топке (или подводящей воздух, если топка угольная). Это действительно можно осуществить. Но ведь паровой котел с топкой — система значительно более инерционная, чем маховик паровой машины. Если ПИД-регулятор должен был предугадывать факт увеличения скорости за несколько секунд или даже за несколько долей секунды до того, как он может наступить на самом деле, то регулятор, поддерживающий скорость постоянной путем изменения количества подаваемого топлива или интенсивности его горения, должен предугадывать возможное изменение скорости уже за несколько минут до того, как оно

должно наступить. Ясно, что такой регулятор будет значительно сложнее, а сложнее, значит, дороже.

Есть и еще один способ, сводящийся к тому, чтобы попросту препятствовать изменению нагрузки. Именно так и поступают в настоящее время, соединяя отдельные электростанции в так называемое энергетическое кольцо. Энергетическое кольцо охватывает области, расположенные в различных часовых поясах. Если, например, в том месте, где расположена данная электростанция, наступила ночь и энергии потребляется мало, электростанция переключается на питание других областей, где еще только наступает вечер. Наоборот, в часы, когда в данной области потребление максимально, другие электростанции кольца передают ей часть своей энергии.

Чтобы такое кольцо работало правильно, снова нужно управление. Но здесь точками приложения управляющих воздействий оказываются уже распределительные устройства, включаемые не на входе, а на выходе паровой машины, а точнее, на выходе генератора, приводимого в движение паровой машиной.

Даже из этого простого примера видно, что вопрос о точках приложения управляющих воздействий совсем не так прост, как нам казалось на первый взгляд. Более того, мы получили некоторое представление о том, как надо искать подобные точки. Можно сказать, что среди нескольких возможных управляющих систем наиболее эффективной оказывается та, которая осуществляет качественное управление при минимальных затратах. Что такое затраты, понять легко, но вот, что такое «качественное управление»? Этот вопрос подводит нас к другому, значительно более общему вопросу: а почему вообще нужно управлять?

В первой главе этой книги мы упомянули вскользь один из всеобщих законов природы, называемый вторым началом термодинамики. Простейшая формулировка этого закона, ставшая в последнее время классической, во всяком случае для популярной литературы, гласит: природа стремится к беспорядку. Но откуда у природы столь странные стремления и что такое беспорядок вообще, чем от отличается от порядка?

Ответы на эти вопросы требуют некоторой подготовки, поэтому давайте перенесемся на некоторое время в область фантастики. Рассмотрим ситуацию, столь полюбившуюся авторам научно-фантастических произведений. Звездолет садится на неизвестную планету. Открываются люки, астронавты спускаются на обожженный выхлопом грунт и вдруг обнаруживают совершенно правильный белый квадрат на сером фоне скалы. Ни у кого не остается ни малейших сомнений в том, что планета населена разумными существами. Правильный квадрат есть несомненный признак разумной деятельности. Но почему? Почему тончайшая игра красок на закатном небе, которую, к слову сказать, еще не удалось в точности воспроизвести ни одному, даже самому гениальному художнику, — это игра неразумной природы, ко всему прочему стремящейся к беспорядку, а вот квадрат — это обязательно признак присутствия разума? Снова вопрос, и снова ответ на него требует некоторой подготовки.

Пусть имеется мешок с несколькими сотнями карточек или фишек, причем на каждой карточке изображена одна из букв русского алфавита. Вытащим из мешка наугад четыре карточки и разложим их на столе слева направо в том порядке, в каком мы вынимали их из мешка. Какова вероятность того, что при этом получится осмысленное русское слово? В словаре русского языка содержится

всего около тысячи четырехбуквенных слов, включая такие архаичные слова, как «веды», и такие заимствованные из других языков слова, как, например, «герц». Общее количество возможных сочетаний из 32 букв по 4 равно, очевидно, $32^4 = 1\,048\,576$. Следовательно, вероятность вытащить из мешка четыре карточки с такими буквами и в таком порядке, чтобы из них составилось осмысленное русское слово, немногим меньше одной тысячной. Еще меньше вероятность составить, вытаскивая карточки из мешка наугад, какое-нибудь данное слово, например слово «стол». Эта вероятность, согласно сказанному выше, меньше одной миллионной. И, наконец, совсем уж исчезающе мала вероятность составить два одинаковых слова подряд. С позиций математики такая вероятность меньше чем 10^{-12}, а с позиций «здравого смысла» мы вправе утверждать, что такого не бывает.

Предположим теперь, что мы написали те же буквы на гальке морского берега. На каждом камешке по одной букве. Волны прибоя все время перемешивают камешки. При этом каждый раз возникает какое-то сочетание букв, в том числе могут, конечно, получаться и осмысленные сочетания. Однако поскольку осмысленных сочетаний значительно меньше, чем неосмысленных, то вероятность появления осмысленного сочетания значительно меньше, а следовательно, как мы показали это в главе шестой, появляться они будут исключительно редко. По этой же причине, если мы сами выложим из камешков с буквами какое-нибудь слово, то совершенно естественно, что первый же удар волны разрушит это слово и заменит его бессмысленным, на наш взгляд, сочетанием букв.

Теперь мы можем уже сделать некоторые выводы. Все окружающие нас предметы, которые мы объединяем под одним понятием «природа», состоят из бесчисленного множества частей, а эти части в свою очередь состоят из бесчисленного множества частиц. Все эти части и частицы находятся в непрерывном движении — таково основное и главнейшее свойство природы, т. е. материального мира. Двигаясь, они естественным образом предстают перед нами каждый раз в различных сочетаниях. Каждое отдельное сочетание по-своему неповторимо, поскольку вероятность его реализации исчезающе мала.

Мы сами как бы делим эти сочетания на два различных класса: сочетания, принадлежащие к одному из классов, мы называем порядком, а сочетания, принадлежащие к другому классу, — беспорядком. Именно потому что к классу «порядок» относится значительно меньше сочетаний, чем к классу «беспорядок», вероятность порядка значительно меньше. Так, в нашем примере с четырехбуквенными словами к классу «порядок» относилось всего лишь 1 000 возможных сочетаний, в то время как к классу «беспорядок» — остальные 1 047 576 сочетаний. Следовательно, слова «природа стремится к беспорядку» надо понимать так: природа не предпочитает одних сочетаний другим. Если мы и вправе в чем-то обвинять природу, то только в безразличии, но отнюдь не в коварных намерениях. Скорее наоборот, именно безразличие природы, приводящее к тому, что каждый раз возникает одно какое-либо сочетание составляющих ее частей и частиц, причем это сочетание немедленно сменяется другим сочетанием, не схожим с предыдущим, и послужило причиной тому, что в числе прочих возникают и те сочетания, которые мы склонны теперь относить к классу порядка. Прекрасно сказано об этом в поэме «О природе вещей», написанной древнеримским поэтом и философом Титом Лукрецием Каром в I веке до нашей эры:

Первоначала вещей, разумеется, вовсе невольно,
Все остроумно в таком разместилися стройном порядке
И о движениях своих не условились раньше, конечно.
Если ж начала вещей во множестве, многоразлично
От бесконечных времен постоянным толчкам подвергаясь,
Тяжестью также своей гнетомые, носятся вечно,
Всячески между собой сочетаясь и все испытуя,
Что только могут они породить из своих столкновений, —
То и случается тут, что они в этом странствии вечном,
Всякие виды пройдя сочетаний и разных движений,
Сходятся так, наконец, что взаимная их совокупность
Часто великих вещей собой образует зачатки:
Моря, земли, и небес, и племени тварей живущих. [1]

Сформулируем теперь некоторые определения, что значительно упростит нам дальнейшее изложение. Так, всякую совокупность конечного числа материальных объектов мы будем называть физической системой или просто системой, а составляющие ее материальные объекты — элементами этой системы. Заметим, и это очень важно, что рассматривая некий объект как элемент системы, мы предполагаем, что сам он не изменяется хотя бы в течение того времени, пока мы наблюдаем систему, и не может быть разделен на более мелкие элементы. Так, например, рассматривая мешок с карточками, на которых написаны буквы, мы считаем, что в течение всего времени, пока мы производим эксперименты с этим мешком, т. е. вытаскиваем из него карточки, ни одна из карточек не окажется разорванной пополам (что в принципе, конечно, возможно) и, например, буква *А* не превратится в букву *Л* из-за того, что в результате частого хватания руками у буквы *А* сотрется перекладина.

Элементы системы находятся в непрерывном движении и вследствие этого каждый раз выступают перед нами в различных сочетаниях. Отдельное сочетание, которое можно отличить от других сочетаний, мы будем называть *состоянием* системы, независимо от того, имеет ли это состояние какой-нибудь смысл. При таких условиях выдвинутый выше тезис о безразличии природы можно сформулировать еще и следующим образом: все состояния физической системы равновероятны.

Некоторую определенную совокупность различных состояний мы будем называть *конфигурацией*. Так, например, всякое состояние физической системы «мешок с карточками», при котором вынутые из мешка карточки (точнее, буквы, написанные на этих карточках) составляют слово, имеющее смысл в русском языке, мы будем относить к конфигурации «слово». Все остальные возможные состояния относятся к конфигурации «не слово».

Конечно, конфигураций может быть больше, чем две. Так, например, конфигурацию «слово» можно подразделить на ряд более мелких конфигураций: существительное, глагол и т. д.

Назовем физическую систему *организованной*, если она в течение достаточно длительного времени остается в пределах некоторой данной конфигурации. Это ни в коей мере не означает прекращения изменения ее состояния. Движение продолжается, и состояния непрерывно сменяются одно другим. Однако в организованной систе-

---

[1] Лукреций, О природе вещей Пер. с латинского Ф. А. Петровского. Изд. АН СССР, 1946, книга пятая, стр. 293, строки 963—966.

ме это движение происходит таким образом, что каждое новое состояние оказывается относящимся к той же самой конфигурации, что и предыдущее.

Теперь все зависит от того, как определить конфигурацию. Если считать, например, что все возможные состояния данной физической системы относятся к одной и той же конфигурации или, возвращаясь к мешку с карточками, считать, что любое сочетание из четырех букв — это слово, то ясно, что система всегда будет находиться в пределах этой конфигурации. Можно поступить иначе, условившись, например, считать словом любые сочетания из четырех букв, начинающиеся с букв А, Б и т. д. до П, и не словом — любые сочетания из четырех букв, начинающиеся с букв Р, С и т. д. до Я. Ясно, что при таком условии система, в которой все состояния равновероятны, будет относиться к конфигурации «слово» лишь в половине общего числа возможных случаев. А для того чтобы постоянно удерживать ее в пределах конфигурации «слово», необходимо произвести какие-то дополнительные действия. Например, все карточки с буквами от А до П сделать из железа, карточки с буквами от Р до Я сделать из меди и вытаскивать первую карточку с помощью магнита, а остальные три — просто руками.

Последнее замечание содержит явный намек на то, каким образом можно изменять вероятности состояний. Однако мы не будем пока вдаваться в обсуждение этой возможности, а сделаем другое, более общее наблюдение. Действительно, сказанное выше наводит на мысль о том, что, определяя конфигурацию, мы тем самым определяем и степень организованности системы. Ведь само слово «организованность» предполагает выполнение каких-то действий по организации. С другой стороны, если конфигурация такова, что к ней могут относиться все без исключения возможные состояния системы, то вряд ли есть основания считать систему, находящуюся в пределах этой конфигурации, организованной.

Все сказанное непосредственно приводит нас к следующему выводу: *степень организованности системы, находящейся в течение длительного времени в пределах данной конфигурации, тем выше, чем меньше вероятность самопроизвольного нахождения системы в пределах этой конфигурации.*

Иными словами, каждой конфигурации системы можно поставить в соответствие определенную величину, которая будет характеризовать степень организованности системы, если она остается в пределах данной конфигурации.

Согласно сказанному выше в качестве такой величины, казалось бы, естественно выбрать величину, обратную вероятности самопроизвольного нахождения системы в пределах данной конфигурации. Но здесь появляется одна трудность.

Мы уже предложили один из способов организации системы «мешок с карточками», состоявший в том, чтобы изготовлять карточки из двух различных материалов — меди и железа, а для вытаскивания пользоваться магнитом Теперь мы несколько видоизменим этот способ. Пусть по-прежнему буквы от А до П написаны на железных карточках, а буквы от Р до Я — на медных. Однако мы не будем использовать магнит, а перед тем, как вытаскивать первую карточку из мешка, мы взвесим ее и вытащим, если она легкая (железная), и не вытащим, если она тяжелая (медная). Поскольку железных и медных карточек в мешке поровну, чтобы выбрать нужную карточку, мы в среднем затратим два взвешивания.

Итак, чтобы вытащить из мешка одну четверку карточек, относящихся к конфигурации «слово», необходимо выполнить два взвешивания (в среднем); чтобы вытащить подряд две четверки карточек, относящихся к конфигурации «слово», нужно выполнить четыре взвешивания, и т. д. по два взвешивания на каждую следующую четверку. Другими словами, количество усилий, затрачиваемых на организацию системы, оказывается равным количеству усилий, затрачиваемых на одну попытку такой организации, умноженному на количество попыток. Это также совершенно естественно.

Иначе будет обстоять дело, если за меру организованности мы примем, как это предлагалось выше, величину, обратную вероятности самопроизвольного прихода системы в пределы данной конфигурации Так, если по-прежнему вытаскивать карточки наугад, невзирая на их вес, то вероятность вытащить четверку карточек, относящуюся к конфигурации «слово», будет равна $1/2$, вероятность вытащить две такие четверки подряд будет равна $1/4$, вероятность вытащить три такие четверки будет равна $1/8$ и т. д. Величины, обратные вероятностям, умножаются, а не складываются, что явно противоречит нашему естественному представлению о том, какой должна быть мера степени организованности.

Поэтому в качестве меры степени организованности системы берут не величину, обратную вероятности, а логарифм этой величины — ведь логарифм произведения равен сумме логарифмов сомножителей. Но мы уже знаем, что если все состояния системы равновероятны, то вероятность для системы оказаться в пределах данной конфигурации пропорциональна количеству состояний, составляющих эту конфигурацию, или, иными словами, пропорциональна количеству способов, которыми может быть построена данная конфигурация.

Установим теперь окончательно, что за меру организованности физической системы, находящейся в течение достаточно длительного времени в пределах данной конфигурации, мы принимаем логарифм величины обратной вероятности того, что система самопроизвольно окажется в пределах данной конфигурации, или взятый со знаком минус логарифм этой вероятности, или же, наконец, величину, пропорциональную взятому со знаком минус логарифму от числа способов, которыми может быть реализована данная конфигурация. В математической записи это выглядит так:

$$S = -k \ln p = k \ln \gamma,$$

где p — вероятность для системы находиться в пределах данной конфигурации; γ — количество способов, которыми может быть реализована данная конфигурация; k — постоянный коэффициент.

Та же самая величина, но взятая с противоположным знаком, получила в физике название *энтропии*. Используя те же обозначения для энтропии, мы можем записать:

$$H = k \ln p = -k \ln \gamma.$$

Ясно, что величина энтропии тем больше, чем больше вероятность конфигурации, в которой находится система. Выражение: энтропия всякой физической системы стремится к возрастанию — представляет собой еще одну, правда, не очень четкую, формулировку второго начала термодинамики.

На самом деле, мы установили выше, что энтропия, равно как и сама физическая система, ни к чему не стремится, во всяком случае в указанном выше смысле. Просто если ограничиваться рассмот-

рением таких систем, как, например, галька на морском берегу, то здесь отсутствуют какие-либо условия, делающие одно конкретное сочетание камешков предпочтительнее другого. Поэтому чем больше различных сочетаний составляют конфигурацию, тем больше вероятность этой конфигурации и тем чаще она наблюдается на самом деле. С другой стороны, если случайно или под воздействием каких-либо внешних причин установилось одно какое-либо сочетание и мы выделяем это сочетание как самостоятельную конфигурацию, то чрезвычайно велика вероятность того, что в ближайший момент времени это сочетание будет нарушено и система перейдет к другой конфигурации, более вероятной.

Все сказанное до сих пор на страницах этой книги позволяет нам утверждать, что цель управления состоит в поддержании физической системы в пределах конфигурации, обладающей малой вероятностью самопроизвольного возникновения. Иными словами, цель управления — понизить энтропию системы или повысить степень ее организации. Все три только что высказанные формулировки полностью эквивалентны друг другу.

Рассмотрим снова самую простую систему — паровую машину. Будем считать, что состояние паровой машины определяется всего лишь тремя факторами: давлением пара, положением заслонки и величиной нагрузки. Если полностью отсутствуют какие-либо регулирующие воздействия, у нас нет никаких оснований предпочесть одну величину угла поворота заслонки всем остальным. То же самое можно сказать и по отношению давления пара или величины нагрузки. Следовательно, мы имеем множество возможных сочетаний значений этих трех параметров и все они равновероятны.

Введем в рассмотрение две различные конфигурации, одна из которых имеет место тогда, когда скорость вращения вала находится в данных пределах, а другая — когда скорость вращения вала имеет произвольное значение. Первая конфигурация может иметь место при достаточно большом количестве различных сочетаний значений параметров. Например, когда давление пара минимально, а заслонка открыта полностью; когда давление пара максимально, нагрузка минимальна, а заслонка только чуть приоткрыта и т. п. В то же время очевидно, что количество сочетаний значений параметров, обеспечивающих произвольное значение скорости, значительно больше. Поэтому есть все основания ожидать, что паровая машина без регулятора будет находиться в пределах второй конфигурации, имеющей большую вероятность. Однако стоит нам соединить заслонку с рычагом регулятора Уатта, как положение резко меняется. Более вероятной становится первая конфигурация, и большую часть времени система находится в пределах этой конфигурации.

Но соединяя заслонку с рычагом регулятора Уатта, мы, вообще говоря, не изменяем вероятностей отдельных ее положений. Наоборот, если по-прежнему считать, что давление пара и нагрузка изменяются произвольно, то и положение заслонки также будет изменяться произвольно и у нас нет никаких оснований предпочесть одно какое-либо положение заслонки всем остальным. Следовательно, все три введенные нами в рассмотрение параметра, взятые по отдельности, по-прежнему могут изменяться так, что все возможные их значения равновероятны. А вот количество сочетаний значений этих параметров уменьшилось, потому что, введя управление, мы поставили значения одного из параметров в зависимость от значений двух других. Иначе, мы сделали движения заслонки согласованны-

ми с движениями других частей системы. Безразличию природы мы противопоставили согласованность, или целенаправленность действий в искусственно созданном механизме.

Рассмотрим теперь еще более простой случай. Пусть давление пара остается постоянным, а изменяется только нагрузка. Предположим также, что нагрузка изменяется случайным образом, и, следовательно, мы ничего не можем сказать о возможных значениях величины этой нагрузки кроме того, что каждое такое значение имеет определенную вероятность.

Обозначим через $p(x)$ вероятность того, что в ближайший момент времени значение величины нагрузки будет заключено между x и $x+\Delta x$, где Δx — наперед заданная малая величина. Напомним читателю, что величину $p(x)$ можно вычислить, если в течение очень долгого времени производить замеры величины нагрузки, например каждую секунду, и затем поделить количество случаев, когда значение измеренной величины оказывалось заключенным между x и Δx, на общее количество замеров. Чем больше количество замеров, тем ближе результат деления к истинному значению вероятности. Выбирая для величины x различные значения в пределах возможного диапазона изменения нагрузки, мы можем аналогичным образом вычислить вероятность для всех этих значений.

Заметим теперь, что для каждого конкретного значения величины нагрузки (при условии, что давление пара постоянно) существует такое положение заслонки, при котором скорость вращения вала находится в заданных пределах. Предположим снова, что управление полностью отсутствует и положение заслонки совершенно произвольно. Тогда мы опять-таки можем говорить только о вероятности $p(y)$ того, что значение угла поворота заслонки α заключено в пределах между y и Δy, где Δy — некоторая малая величина.

Примем полную величину диапазона возможных изменений нагрузки за единицу, а величину Δx выберем равной, например, 0,001. Если к тому же предположить, что все значения величины нагрузки равновероятны, то величина вероятности $p(x)$ для любого x, очевидно, окажется равной 0,001.

Проделаем то же самое с заслонкой, т. е. примем величину полного возможного угла поворота заслонки за единицу, а Δy положим равным 0,001. Если считать все положения заслонки равновероятными, то $p(y)$ также окажется равным 0,001 для любого y.

Итак, факт, состоящий в том, что величина нагрузки имеет данное значение, и факт, состоящий в том, что угол поворота заслонки имеет данное значение,— это случайные события, которые можно характеризовать только вероятностью их наступления.

Рассмотрим теперь события, состоящие в том, что нагрузка имеет величину x, а угол поворота заслонки имеет величину y, причем y таково, что скорость вращения вала машины находится в заданных пределах. Вероятность подобного события обозначим через $p(x, y)$. Какова же будет эта вероятность? Из сказанного ясно, что $p(x, y)$ — это вероятность одновременного наступления двух событий, причем в случае полного отсутствия управления это вероятность одновременного наступления двух независимых событий. А коли так, мы вправе применить рассмотренную в главе теорему умножения вероятностей и положить

$$p(x, y) = p(x)\,p(y) = 0{,}000001.$$

Так оно и есть на самом деле! Если все сделанные выше предположения справедливы, то ситуация, когда заслонка паровой машины случайно установится именно в то положение, которое необходимо для поддержания данной скорости, может встретиться в среднем лишь один раз на миллион случаев.

С другой стороны, вводя управление, мы повышаем вероятность $p(x, y)$. Заметим, что мы повышаем именно вероятность, поскольку, как это следует из сказанного в главе пятой, даже самая совершенная система управления не может гарантировать нам, что заслонка окажется в нужном положении во всех без исключения случаях. Еще более справедливым это утверждение оказывается для более сложных систем, рассмотренных в главе шестой. Следовательно, мерой согласованности между движением заслонки и изменением нагрузки мы с полным основанием можем считать величину, показывающую, насколько $p(x, y)$ при наличии управления превышает значение $p(x)p(y)$, т. е. величину той же вероятности при отсутствии управления.

С учетом соображений, которые были развиты нами выше при выводе меры организованности системы, примем теперь величину

$$H(x, y) = \ln \frac{p(x, y)}{p(x)\, p(y)}$$

за меру качества управления. Величина $H(x, y)$ называется ***взаимной информацией*** случайных событий x и y или, иначе, количеством информации, содержащейся в событии y относительно события x. Так мы пришли к еще одному важнейшему понятию, рассматриваемому в рамках кибернетики, — понятию *информации*. Мы установили также, что чем больше информации о поведении внешней среды несет с собой управляющее воздействие, тем выше качество управления.

И все же мы должны констатировать, что, даже достигнув высокого качества управления, конструктор управляющей системы еще не может считать себя полностью удовлетворенным. И правда, стоит ли городить сложные и дорогие управляющие системы для той же паровой машины, если, как это было рассмотрено в начале главы, большая часть пара из котла через предохранительный клапан будет уходить на ветер? Ясно, что, кроме качества управления, важны еще общие затраты на работу системы в целом. Последнее соображение позволяет нам определить эффективность системы автоматического управления как отношение качества управления к общим затратам.

Так по какому же месту надо стучать молотком? Сумеем ли мы теперь, пройдя столь долгий путь и познакомившись с принципом действия новейшего чуда современности — цифровых вычислительных машин, получить удовлетворительный ответ на этот вопрос. К сожалению, нет. Тайна Николая Ивановича по-прежнему остается нераскрытой.

Но многое мы все же знаем. Во-первых, мы знаем, что мест, по которым можно стучать молотком, много. Точнее, каждая система имеет несколько точек, к которым можно прикладывать управляющее воздействие, причем чем сложнее система, тем таких точек больше. Во-вторых, мы знаем, что, выбирая одну какую-либо точку для приложения управляющего воздействия, мы должны выбрать также соответствующую стратегию управления. Стратегий таких много, но лучше из них та, при которой качество управления оказывается бо-

лее высоким. Наконец, мы знаем, к чему стремиться, проектируя автоматическую систему управления. Стремиться надо к тому, чтобы наиболее высокой оказалась эффективность управления.

Как же надо строить эффективную систему управления? Современная теория автоматического управления располагает многими средствами решения этой задачи. Все эти средства, однако, можно свести к двум основным группам. Первая из них — это составление математических моделей. Суть всех методов, относящихся к этой группе, состоит в том, что знание, имеющееся у нас об объекте управления, мы используем для того, чтобы составить математическое описание. Располагая таким описанием, достаточно просто определить, изменение каких именно параметров в наибольшей мере влияет на конечный результат, а следовательно, узнать и точки возможных приложений управляющих воздействий. Используемые при этом методы объединяются сейчас под общим названием *теория чувствительности*. Затем составляется такое же точно математическое описание системы управления и проверяется, как объект и система управления работают совместно. Отдельные параметры системы управления изменяются до тех пор, пока не будет достигнуто наибольшее возможное значение эффективности. Все это можно проделать с помощью цифровой вычислительной машины, и тогда мы приходим к тому, что принято называть сейчас автоматическим проектированием.

Вторая группа методов основывается на общей идее обучения. Система управления, которая обязательно содержит в этом случае цифровую вычислительную машину, подсоединяется к объекту. Первоначально системе не задается никакой стратегии управления. Устанавливается только цель, которая, как было установлено выше, состоит в достижении наибольшей эффективности. Стратегия управления вырабатывается постепенно методом проб и ошибок точно так же, как это было описано в предыдущей главе. Таким образом создаются адаптивные (приспосабливающиеся) самообучающиеся системы.

Рассмотрим в заключение этой главы еще один вопрос. Выше мы безоговорочно приняли тезис о равнодушии природы. Если это на самом деле так, то процессы управления могут осуществляться лишь в искусственно созданных системах. Так ли это на самом деле? Настолько ли равнодушна природа, как это следует из второго начала термодинамики?

Заметим прежде всего, что, пытаясь объяснить сущность второго начала термодинамики, мы ввели очень много различных условий. Мы совершенно не учитывали те воздействия, которым неизбежно подвергается всякая физическая система со стороны внешней среды. На элементы системы мы наложили чрезвычайно суровое ограничение, запретив им делиться на части, а также полностью исключив из рассмотрения процессы, происходящие внутри самих элементов. Наконец, мы совершенно не рассматривали влияния других законов природы, столь же всеобщих, как и второе начало термодинамики. Посмотрим теперь, что получится, если хотя бы частично снять эти ограничения.

Начнем с последнего. Выше мы все время исходили из предположения что все возможные состояния системы равновероятны. В качестве модели такой системы мы брали мешок с карточками и настаивали на том, что карточки из мешка вытаскиваются наугад т. е. совершенно случайным образом.

Можно предложить и другую модель, более близкую к действительности — стеклянную банку, заполненную каким-нибудь газом, например водородом. Банка хорошо закупорена, а стенки ее настолько толстые, что практически теплообмен между газом и внешней средой полностью отсутствует. Газ внутри банки находится при определенной температуре. Это означает, что средняя скорость движения его молекул имеет некоторую постоянную величину. При этом каждая отдельная молекула движется с некоторой скоростью, причем данная скорость может как угодно отличаться от средней. Молекулы непрерывно сталкиваются между собой, и после каждого такого столкновения изменяются как направления движения, так и скорости каждой из двух столкнувшихся молекул.

Давайте мысленно привяжем к каждой молекуле ярлычок и напишем на нем число, равное скорости данной молекулы в данный момент времени. Полную совокупность таких чисел определим как состояние физической системы.

После каждого столкновения числа, написанные на ярлычках, придется заменять другими, и, следовательно, система непрерывно переходит из одного состояния в другое.

Если предположить, что в какой-то момент времени мы знали все числа, написанные на ярлычках, т. е. скорости движения всех молекул, то после многократных столкновений эти скорости изменятся, и если теперь мы взглянем на нашу банку с газом, каждое число, написанное на ярлычке, можно рассматривать как случайное. Казалось бы, здесь снова можно говорить о безразличии природы, которое в данном случае проявляется в том, что каждая молекула способна принимать любое значение скорости. Но на самом деле это не совсем так. Вспомним, что скорость молекулы определяет ее кинетическую энергию, а сумма энергий всех молекул составляет полную энергию газа, заключенного в банке. Выше мы сделали предположение, что обмен энергией между газом, находящимся в банке, и внешней средой отсутствует, следовательно, в силу закона сохранения энергии или, как его иначе называют, первого начала термодинамики энергия газа должна оставаться постоянной, а значит, должна оставаться постоянной и сумма скоростей отдельных молекул.

Поскольку скорость молекулы не может быть отрицательной (мы рассматриваем только абсолютные значения скоростей, а не их направления), сказанное означает, что скорость отдельной молекулы, во всяком случае, не может быть больше той суммы скоростей, которая и определяет общую энергию системы. Опять мы можем сказать, что каждая молекула в рассматриваемом примере может принимать любое из числа возможных значений скорости, причем слово «возможных» приобретает в данном случае совершенно конкретный смысл: возможных, т. е. таких, при которых не нарушается закон сохранения энергии.

Итак, мы видим, что безразличие природы не безгранично. Она безразлична лишь до тех пор, пока не нарушаются ее основные законы.

Но пойдем дальше. В примере с газом мы рассматривали молекулы как упругие шарики, которые сталкиваются между собой, а также со стенками сосуда и затем разлетаются в разные стороны, не претерпевая при этом никаких изменений, кроме изменения скорости. Но мы знаем, что каждая молекула в свою очередь представляет собой сложную систему, состоящую из нескольких атомов.

Каждый атом — это опять сложная система, состоящая из ядра и нескольких движущихся вокруг него электронов. Согласно основному принципу квантовой физики электрон в атоме не может принимать любого значения энергии, а лишь сравнительно небольшое число разрешенных значений. Кроме того, общее количество электронов в атоме должно быть таким, чтобы сумма их отрицательных зарядов уравновешивала положительный заряд ядра. Все это дополнительные ограничения, накладываемые «равнодушной» природой.

Если вернуться теперь к той же самой банке, но предположить, что она заполнена не чистым водородом, а смесью двух газов — водорода и кислорода, причем такой смесью, что на две части водорода приходится одна часть кислорода, да к тому же еще нагреть эту смесь до определенной температуры, то вместо безразличных столкновений и отскакиваний молекул произойдет совсем другое. Молекулы водорода начнут соединяться с молекулами кислорода, в результате чего образуется вода. Мы не рекомендуем читателю находиться вблизи такой банки, поскольку процесс соединения молекул происходит очень бурно. Попросту он сопровождается взрывом.

Но в то же время мы вынуждены констатировать, что в данном случае беспорядок сменяется относительно бо́льшим порядком. Во всяком случае пространство, вначале заполненное хаотически движущимися атомами, оказывается теперь заполненным тройками таких атомов, причем в пределах каждой тройки атомы связаны между собой в строго определенном порядке.

Еще более впечатляющая картина получится в том случае, если вместо водорода и кислорода мы возьмем два других газа, а именно пары натрия и хлор. Атомы снова начнут соединяться друг с другом, и в результате такого соединения образуются правильные кубики кристаллов поваренной соли. Здесь уже порядок выступает в настолько явном виде, что всякий, кто не знаком с кристаллами, мог бы усмотреть в подобном явлении разумную деятельность с неменьшими основаниями, чем если бы он увидел квадрат, начерченный на скале незнакомой планеты.

Попробуем разобраться, что же, собственно, происходит. В соответствии с теми же законами квантовой физики, электроны, которые могут принимать только строго определенные значения энергии, располагаются на различных расстояниях от атомного ядра. Каждому такому расстоянию соответствует то, что принято называть электронной оболочкой. На оболочке, расположенной ближе всего к ядру, могут располагаться только либо один, либо два электрона. На последующих оболочках может располагаться до восьми электронов.

Свойства атома зависят от того, сколько электронов имеется на внешней оболочке. Если их ровно восемь, вещество, состоящее из таких атомов, как говорят, химически инертно. Если же электронов на внешней оболочке меньше, чем восемь, такие атомы охотно соединяются с другими атомами, стремясь при этом образовать молекулы, у которых общая для обоих атомов внешняя оболочка содержит ровно восемь электронов. Все это хорошо известно читателю из обычного курса химии.

Однако попробуем теперь рассмотреть те же процессы под несколько другим углом зрения. Предположим на время, что атомы различных веществ просто обладали бы способностью «склеиваться» друг с другом, причем совершенно безразлично, какой атом с каким. Представим себе атомы этакими шариками, намазанными клеем.

Снова представим себе банку, наполненную такими атомами, которые к тому же находятся в непрерывном движении. Какова вероятность образования молекулы, состоящей из двух атомов, в данном месте объема банки? Если атомы — это шарики, намазанные клеем, то для образования молекулы достаточно, чтобы два атома просто оказались в нужном месте. Следовательно, искомая нами вероятность — это вероятность сложного события, сотоящего в том, что атом некоторого вещества оказался в данный момент времени в данном месте (обозначим это событие как x) и атом другого вещества оказался в тот же самый момент времени в том же самом месте (обозначим это событие как y). Вероятности сложных событий мы условились выше обозначать через $p(x, y)$. Следовательно, $p(x, y)$ — это вероятность образования двухатомной молекулы в случае, когда атомы представляют собой шарики, намазанные клеем. Поскольку оба наших события очевидно независимы, то $p(x, y) = p(x)p(y)$, где $p(x)$ — вероятность атому вещества А оказаться в данное время в данном месте, а $p(y)$ — тоже самое для атома вещества Б.

Если пойти теперь несколько дальше и предположить, что наша банка заполнена атомами самых различных веществ, то очевидно, что эти атомы будут соединяться в любых сочетаниях и все эти сочетания будут равновероятными, если, конечно, все атомы представляют собой шарики, намазанные клеем, и все они с равной вероятностью могут оказаться в данном месте банки.

Совсем иначе будет обстоять дело в случае настоящих атомов. Здесь для образования молекулы еще недостаточно, чтобы два атома в одно и то же время оказались в одном и том месте. Необходимо еще одно дополнительное условие, а именно, чтобы внешние оболочки встретившихся атомов определенным образом соответствовали друг другу. Молекула воды, например, образуется тогда, когда встречаются два атома водорода, во внешних оболочках которых имеется по одному электрону, и один атом кислорода, у которого во внешней оболочке нехватает как раз двух электронов. Следовательно, вероятность образования молекулы будет теперь отличаться от вероятности встречи атомов. Требуется еще дополнительное условие, чтобы встретились нужные атомы.

Теперь можно снова привлечь введенное выше понятие конфигурации. Если банка заполнена атомами кислорода и водорода, а мы знаем об этих атомах только, что они могут склеиваться по три, то в силу всех проведенных выше рассуждений мы вправе ожидать, что такие тройки атомов будут образовываться самым произвольным образом, т. е. возможны образования троек: водород-водород-водород, водород-водород-кислород, водород-кислород-кислород, кислород-кислород-кислород. Наиболее вероятной окажется конфигурация, при которой тройки каждого вида встречаются в одинаковых количествах. Мы были бы вправе утверждать даже, ссылаясь на второе начало термодинамики, что если в некоторый данный момент времени в банке имеет место другая конфигурация, то рано или поздно она обязательно уступит свое место конфигурации наиболее вероятной.

Однако опыт говорит нам о другом. Если в банке имеются атомы кислорода и водорода и если выполняются некоторые дополнительные условия, состоящие в данном случае в том, что атомы должны обладать определенным запасом кинетической энергии, то какова бы ни была исходная конфигурация, через весьма небольшой промежуток времени она уступит место другой конфигурации, а именно

такой, когда каждый атом кислорода окажется соединенным с двумя атомами водорода. Только те атомы, которые оказались «лишними», могут соединяться друг с другом иным и то далеко не всяким образом.

Нужно ли делать из этого вывод, что второе начало термодинамики действует не всегда? «Конечно, нет», — ответит на такой вопрос ортодоксальный физик. Ведь из многочисленных наблюдений и опытов мы прекрасно знаем, что именно последняя из описанных конфигураций и является в рассматриваемом случае наиболее вероятной. И система «банка с кислородом и водородом» стремится принять наиболее вероятное состояние в полном соответствии со вторым началом термодинамики.

Но тогда возникает следующий вопрос. Мы знаем и другое: если заполнить банку атомами других веществ или рассматривать ту же банку с кислородом и водородом, но при других значениях кинетической энергии атомов, то наиболее вероятными окажутся другие конфигурации. Вправе ли мы утверждать тогда, что второе начало, а может быть, и другие фундаментальные законы термодинамики проявляются по-разному в зависимости от того, что мы знаем о системе, где происходят те или иные процессы? Ну, конечно же, нет. Процессы, происходящие в природе, ни в малейшей степени не зависят от того, что мы о них знаем и не знаем. А вот сами атомы — те действительно «знают», какие конфигурации они должны образовывать в тех или иных условиях.

Следовательно, мы вправе сделать сейчас чрезвычайно важный вывод. *Атомы различных веществ в силу особенностей строения их внешних электронных оболочек содержат определенное количество информации.* Эта информация и позволяет отличать, например, атом водорода от атома кислорода.

Очень интересно, что информация, содержащаяся в атомах, в разных случаях используется по-разному. Человек-исследователь получает информацию косвенно, исследуя физические, химические и другие свойства веществ. К сожалению, современная техника еще не дает возможности исследователю увидеть электроны в атоме и подсчитать их количество на оболочках. Природа же использует информацию, содержащуюся в атомах, непосредственно при химических реакциях, т. е. при образовании молекул из отдельных атомов. Так или иначе, но именно информация и есть та причина, которая позволяет создавать системы, обладающие бóльшим относительным порядком, чем тот исходный материал, из которого они создаются.

Заметим, что вообще-то говоря, мы могли и не привлекать к рассмотрению столь тонкие объекты, как атомы. Тот же самый эффект был нами уже использован однажды, когда мы предложили изготовлять карточки в мешке из двух различных материалов — железа и меди. Различие между медными и железными карточками имело тогда тот же самый смысл, что и различие, например, между атомами водорода и кислорода. В этой связи можно привести и еще один пример.

Заполним теперь наш мешок не карточками, а металлическими кубиками. Если высыпать эти кубики из мешка, то они образуют кучку, причем в пределах этой кучки кубики будут распределяться совершенно случайным образом. Если высыпать кубики на деревянную доску и продолжать встряхивать эту доску, то можно получать любые сочетания кубиков, причем все они будут равновероятны,

а вероятность каждого данного сочетания представляет собой чрезвычайно малую величину.

Ситуация резко изменится, если кубики намагнитить. Тогда они начнут притягиваться друг к другу, причем к определенной стороне одного кубика будет притягиваться совершенно определенная сторона другого кубика. Если вытряхнуть такие кубики из мешка на доску и встряхивать эту доску, то вместо беспорядочного распределения будут получаться забавные узоры. Предлагалось даже использовать такие кубики для создания абстрактных скульптур.

Ясно, что здесь мы снова наблюдаем уже знакомое нам явление. Намагниченный кубик — это все равно что атом с определенной структурой внешней электронной оболочки. Он сочетается с другими кубиками не произвольно а совершенно определенным образом. Система, которая строится из таких кубиков, при желании может рассматриваться либо как абстрактная скульптура, либо как некий аналог кристаллических решеток, создаваемых природой. Кубики можно, например, намагнитить, так чтобы из них получались узоры, напоминающие снежинки.

Сделаем еще одно наблюдение. Смесь двух газов — кислорода и водорода, даже если в ней выдержаны должные пропорции, может в течение сколь угодно долгого времени оставаться такой же точно смесью и в ней не будет образовываться никаких молекул воды. Причина этому состоит в том, что атомы самих газов кислорода и водорода также соединяются в молекулы. Молекула водорода, например, состоит из двух атомов, и их общая электронная оболочка содержит ровно два электрона. Такая молекула инертна и поэтому реакции в смеси не возникает. Если же мы нагреем хотя бы небольшой участок смеси, то под влиянием дополнительной энергии нагревания молекулы газов начнут разбиваться на отдельные атомы, а эти атомы в свою очередь начнут соединяться между собой, но уже в других сочетаниях. Поскольку реакция соединения кислорода с водородом сопровождается выделением энергии, а эта энергия в свою очередь может быть затрачена на разрыв связей других молекул, возникает так называемая цепная реакция, проще говоря, взрыв.

Все сказанное выше можно обобщить следующим образом. Для того чтобы в физической системе возник процесс, направленный в сторону достижения бо́льшего относительного порядка, необходимо, по меньшей мере, два условия. Первое из них — наличие в системе определенного количества информации. Такую информацию, как мы уже установили, несут в себе сами атомы из-за особенности структуры их внешних электронных оболочек или металлические кубики, если они намагничены. Второе условие можно назвать внешним. Для реакции образования воды в смеси кислорода с водородом таким внешним условием явилось первоначальное нагревание. В случае намагниченных кубиков внешнее условие — это встряхивание доски, на которую насыпаны кубики.

Образование более сложных и менее вероятных конфигураций требует уже не одно условие, а наличие сочетаний большого количества различных внешних условий. Так, например, если составить смесь различных веществ, углерода, водорода, азота и некоторых других и подвергнуть эту смесь воздействию совершенно определенного сочетания различных внешних условий, таких как температура, давление, электрическое поле, а также наличие специальных веществ, называемых катализаторами, то в смеси начнется процесс, при-

водящий к образованию чрезвычайно сложных молекул — молекул белка

В настоящее время ученые умеют искусственно создавать такие условия и синтезировать белок. Правда, для этого понадобились чрезвычайно сложные установки, обеспечивающие получение и поддержание такого сочетания условий, которое само по себе мало вероятно. Но было время, когда подобное сочетание условий создалось естественным образом, — именно этому мы и обязаны появлению на земле живых существ и в том числе нас самих.

Молекула белка обладает замечательным свойством. Сам факт присутствия этой молекулы в смеси веществ приводит к тому, что начинают возникать другие подобные ей молекулы, точно так же как при опускании кристаллика в перенасыщенный раствор какой-нибудь соли мы вызываем в нем процесс кристаллизации.

В свете всего сказанного выше мы способны теперь объяснить подобное явление следующим образом. Сочетание внешних условий, приведшее к созданию одной белковой молекулы, представляет собой конфигурацию, вероятность самопроизвольного образования которой чрезвычайно мала. Следовательно, такая конфигурация сама по себе содержит определенное количество информации и эта информация передается белковой молекуле. Молекула «запоминает» информацию точно таким же образом, как в цифровой вычислительной машине мы запоминали информацию, записывая ее на карточках Затем белковая молекула передает запомненную информацию окружающей ее среде, вызывая образование себе подобных. Назвав информацию, запомненную белковой молекулой, стратегией управления, мы можем закончить эту главу.

Аппетит поистине приходит во время еды. Назвав информацию, заключенную в белковой молекуле, стратегией управления, авторы получили блестящую возможность построить модель белковой молекулы, а затем заняться отысканием в этой модели все тех же датчиков, линий связи, усилителей и исполнительных механизмов. А коли так, то еще одно небольшое усилие — и можно опять вернуться к лягушкам и мамонтам, автомобилям и мылу. Но все это будет составлять предмет уже совсем другой науки, называемой бионикой. Поэтому не будем уподобляться засидевшемуся гостю и лучше всего подведем сейчас

ПОСЛЕДНИЕ ИТОГИ

Кибернетика — это наука, изучающая определенный класс процессов, происходящих в окружающем нас мире, и вскрывающая общие закономерности протекания этих процессов. Главнейшим свойством окружающего нас мира является то, что он материален, т. е. существует независимо от нашего сознания. Материя в природе находится в постоянном движении. Это опять-таки главнейшее ее свойство. Мера способности совершать различные движения назы-

вается в физике энергией. Изучая окружающий нас мир, мы сознательно выделяем отдельные его части и называем их физическими системами. Каждая отдельная физическая система ведет себя точно так же, как и мир в целом. Составляющие ее элементы находятся в постоянном движении. Система обладает определенным запасом энергии, которую она может сохранять внутри себя и которой она может обмениваться с другими системами

Кибернетика, как, впрочем, и всякая другая наука, изучает физические системы, обладающие запасом энергии. Рассматривая физическую систему как состоящую из отдельных элементов, причем такое деление на элементы мы, в известном смысле, проводим произвольным образом, мы убеждаемся, что в процессе движения элементы системы предстают перед нами в самых различных сочетаниях. Каждое конкретное сочетание мы назвали выше состоянием физической системы

Состояния системы подчиняются фундаментальному закону природы, названному законом сохранения энергии, или первым началом термодинамики. Этот закон гласит, что если в данный момент времени общая энергия системы имеет некоторую определенную величину, то в системе возможны лишь такие состояния, при которых сумма энергии всех элементов, составляющих систему, в точности равна общей энергии системы. Закон сохранения энергии позволяет нам сразу же разделить все сочетания элементов физической системы на два класса: разрешенные и запрещенные, и рассматривать лишь разрешенные сочетания.

Все сказанное пока что не имеет никакого отношения к кибернетике. Мы определили лишь общие условия, в которых можно проводить дальнейшее рассмотрение.

Различные состояния физической системы из числа разрешенных или, как мы говорили выше, возможные состояния можно группировать по тем или иным признакам в классы состояний, которые мы назвали конфигурациями. Каждая конфигурация включает в свой состав какое-то количество возможных состояний, т. е. сочетаний элементов физической системы. Другой фундаментальный закон природы — второе начало термодинамики — гласит, что в замкнутой физической системе все состояния равновероятны, а следовательно, из различных возможных конфигураций вероятнее та, которая объединяет большее число состояний или, другими словами, которая может быть образована большим количеством способов. Чрезвычайно важную роль здесь играет словечко «замкнутая». Оно означает, что второе начало термодинамики справедливо лишь для систем, полностью изолированных от всего остального внешнего мира.

Таким образом, если в замкнутой, т. е. полностью изолированной, физической системе каким-то образом возникает конфигурация, имеющая малую вероятность, то в процессе дальнейшего движения эта конфигурация обязательно будет заменена другой, имеющей большую вероятность. Другими словами, в замкнутой системе действуют процессы, сопровождающиеся возникновением наиболее вероятной конфигурации. Такие процессы мы можем назвать термодинамическими и снова все это пока не имеет никакого отношения к кибернетике. Изучением закономерностей протекания термодинамических процессов занимается наука термодинамика.

Повод для привлечения науки кибернетики возникает тогда, когда мы замечаем, что в природе, кроме термодинамических процессов, т. е. процессов, сопровождающихся переходом от порядка к

беспорядку, наблюдаются и другие, противоположные им процессы, протекание которых сопровождается образованием менее вероятных конфигураций. Заметим сразу же, что наличие таких процессов не противоречит второму началу термодинамики. В конце предыдущей главы мы показали, что для возникновения процессов, сопровождающихся установлением порядка, или, как мы их назвали выше, процессов управления необходимо создание определенных внешних условий. А коли речь идет о внешних условиях, значит, совершенно очевидно, что рассматриваемая физическая система перестает быть замкнутой.

Однако в то же время процессы управления, как и термодинамические процессы, подчиняются своим закономерностям. Изучением этих закономерностей и занимается наука кибернетика.

Первую такую закономерность мы только что установили. процессы управления могут протекать лишь в физических системах, имеющих связь с внешней средой, причем сами процессы управления являются непосредственным следствием наличия такой связи. Сущность процесса управления состоит в том, что создаются условия для образования мало вероятных конфигураций. Создать такие условия — это и значит постучать молотком (в большинстве случаев, конечно, в переносном смысле) по нужному месту и в нужное время. Поэтому мы продолжаем даже на столь серьезном уровне рассмотрения нести полную ответственность за то определение, которое мы дали кибернетике в самом начале книги. Сами по себе эти условия столь же разнообразны, сколь разнообразны физические системы.

Более того, чем сложнее физическая система, тем больше условий, необходимых для возникновения в ней процессов управления, и тем в более разнообразных сочетаниях эти условия должны создаваться. Можно сказать и сильнее — для каждой конкретной конфигурации, возникающей в физической системе, существует свое определенное сочетание условий, позволяющее перевести систему из этой конфигурации в другую, менее вероятную.

Сказанное позволяет нам нарисовать следующую схему. Пусть имеется физическая система, которая может находиться каждый раз в одном из N состояний (число N чрезвычайно велико), и по тем или иным соображениям мы рассматриваем все эти состояния как относящиеся к M конфигурациям. Среди этих M конфигураций имеются более и менее вероятные. Переход от менее вероятных конфигураций к более вероятным совершается сам по себе и не требует никаких дополнительных действий с нашей стороны. Наоборот, переход от более вероятных конфигураций к менее вероятным требует каждый раз создания определенных условий.

Предположим, что мы перенумеровали все M конфигураций в порядке возрастания их вероятности. Иными словами, наименее вероятной конфигурации мы присвоили номер 1, а наиболее вероятной — номер M. Тогда мы можем утверждать, что в общем случае для каждой пары чисел i и j ($i<j \leqslant M$) существует свое сочетание условий, позволяющее возбудить процесс, переводящий систему из состояния j в состояние i. Таких различных сочетаний условий в общем случае столько же, сколько различных пар чисел i и j, отвечающих установленным выше требованиям.

Значит, если мы хотим возбудить процесс управления, переводящий систему в некоторую конкретную конфигурацию, например конфигурацию номер 8, мы должны создать необходимое для этого

сочетание условий. Но поскольку в общем случае такое сочетание условий будет своим для каждой конфигурации, в которой находится система, то чтобы выбрать нужное сочетание, необходимо знать эту конфигурацию.

Сказанное представляет собой содержание второго фундаментального закона кибернетики: управление физической системой требует знания той конфигурации, в которой находится система, или, в другой формулировке, требует наличия информации о состоянии системы.

Но создание условий, какими бы простыми они ни были, всегда требует затрат времени. За это время система может перейти и обязательно перейдет к другой, более вероятной конфигурации. Следовательно, мало знать конфигурацию, в которой находится система в данный момент времени, нужно еще уметь предсказать будущее поведение системы на то время вперед, в течение которого будут создаваться соответствующие условия.

Третий основной закон кибернетики состоит в том, что для управления необходимо наличие информации не только о состоянии системы, но и о том, каким образом изменяются эти состояния.

Получив нужную информацию, мы выбираем сочетание условий. Такой выбор называется принятием решения. Последовательность принимаемых решений составляет стратегию — стратегию управления. Стратегия управления представляет собой своеобразное описание физической системы. Действительно, если такая стратегия полна, то она обязательно содержит в себе перечень всех конфигураций, в которых может находиться система, и всех действий, которые надо произвести, чтобы перейти от одной конфигурации к другой. Заметим, что если цель управления состоит в том, чтобы поддерживать систему в пределах одной какой-то выбранной конфигурации, то, вообще говоря, возможны случаи, когда система будет оказываться в пределах конфигураций с меньшими номерами, т. е конфигураций еще менее вероятных, чем данная. Тогда не надо создавать никаких условий, следует просто подождать, пока второе начало термодинамики не окажет свое неизбежное действие. Поэтому в состав всякой стратегии управления может входить и отсутствие какого бы то ни было управления. Это обстоятельство мы неоднократно подчеркивали в предыдущих главах.

И снова мы приходим к той же схеме. Знание о состояниях физической системы, представляющей собой объект управления, получается с помощью датчиков. Датчики могут быть как искусственными, так и естественными, как очень простыми, так и очень сложными. Простейшие датчики — это, например, термопара две проволочки из различных материалов, сваренные своими концами, или светочувствительные клетки, сообщающие подсолнуху о том, где находится солнце. Примеры сложных датчиков — человеческий глаз или радиолокационная система противовоздушной обороны. Но задача у всех этих устройств одна — получение информации.

Информация, полученная датчиками, используется для разработки стратегии управления. Опять-таки в зависимости от сложности самой стратегии ее разработкой могут заниматься либо столь простые системы, как регулятор Уатта, грузик, подвешенный на пружинках, или простой нервный контур, заставляющий нас отдергивать руку, если мы прикоснулись к чему-то горячему, либо столь сложные системы, как современная цифровая вычислительная машина или мозг человека.

Наконец, уже имеющаяся стратегия реализуется в виде управляющих воздействий. Здесь снова мы имеем широчайший диапазон от заслонки в пароподводящей трубе до тончайших процессов в растворах при введении катализаторов, регулирующих протекание сложных химических реакций.

Все эти процессы подчиняются единым законам, законам кибернетики. Законы кибернетики оказываются общими и для естественных и для искусственно созданных физических систем. Именно это обстоятельство выдвигает кибернетику в ряд общих физических теорий, таких как термодинамика или статистическая физика Законы кибернетики — это законы природы

Используя законы кибернетики, мы создаем автоматические системы. Создает их и природа без нашего участия Однако если ограничиться рассмотрением только искусственно создаваемых систем, можно сказать следующее. Количество типов различных датчиков, создаваемых в настоящее время, огромно. Изготовлению датчиков и разработке новых их типов посвящена самостоятельная отрасль — измерительная техника. Существует и наука — метрология, разрабатывающая общие принципы контрольно-измерительных систем. Передача информации, получаемой от датчика, находится в ведении техники связи или в более общем случае — телемеханики. В последние годы из потребностей техники связи родилась самостоятельная наука — теория информации. Теория информации учит нас, как наиболее экономным образом и с максимальной достоверностью передать наибольшее количество сообщений по наличным техническим средствам связи. К слову сказать, техника связи — это одна из наиболее быстро и наиболее успешно развивающихся в настоящее время отраслей техники. Ярчайшим подтверждением тому могут служить спутники связи, позволяющие жителям Владивостока смотреть московские телевизионные передачи, или лазерная техника.

Разработка стратегий относится к области теории автоматического управления. Эта теория также переживает в настоящее время своеобразную революцию. Наряду с классическими ПИД-регуляторами все более широкое применение в составе систем автоматического управления находят цифровые вычислительные машины. Сама теория обогатилась в последние годы такими разделами, как, например, теория игр или теория решений. И то и другое принято объединять под общим названием теории исследования операций. Конструированием цифровых вычислительных машин занимается самостоятельная отрасль — вычислительная техника.

Наконец, собственно автоматика — это область, занимающаяся исполнительными механизмами, или область, к ведению которой относятся создание и организация управляющих воздействий.

Мы перечислили здесь только самые главные направления. Существует еще много других, второстепенных, и, кроме того, в своем развитии главные направления также подразделяются на более узкие русла. И при всем том нет ни малейших оснований относить к области кибернетики, скажем, метрологию, технику связи или вычислительную технику. Мы ведь не считаем теорию электрических цепей разделом математики по той лишь причине, что в теории электрических цепей широко используются дифференциальные уравнения.

Задача кибернетики — открывать и исследовать общие законы управления, являющиеся, как это неоднократно отмечалось, фунда-

ментальными законами природы. Задача каждой из перечисленных выше отраслей техники — создание и совершенствование средств измерения, передачи данных, выработки и реализации стратегий и собственно автоматизация всевозможных технологических процессов.

В этой небольшой книжке мы пытались показать, как на самом деле действуют приборы, относящиеся ко всем перечисленным выше областям. Мы пытались показать также, что получается, если соединить приборы различного назначения в единую систему — систему автоматического управления. Верными нашими помощниками на этом пути были мамонты и автомобили, лягушки, паровые и швейные машины, веревки и, наконец, мыло.

Перед тем как окончательно распрощаться с читателем, вернемся еще ненадолго к вопросу о равнодушии природы. У нас было уже много возможностей убедиться, что на самом деле природа совсем не так уж равнодушна. Вводя в действие процессы управления, природа способна создавать сложнейшие физические системы, включая живые организмы и в том числе самого человека. Зарождение жизни на земле, т. е. создание первых белковых молекул оказалось возможным только благодаря созданию чрезвычайно редкой комбинации большого числа разнообразных условий. Но и поддержание жизни, а тем более ее развитие, также требует многих условий, далеко не всегда создающихся естественным путем. Человек создает эти условия сам. Все, начиная от домов, в которых мы живем, и кончая книгами, которые мы читаем, это результат деятельности, направленной на создание в окружающих нас физических системах конфигураций, имеющих чрезвычайно малую вероятность самопроизвольного возникновения. Такую деятельность принято называть разумной.

Но все сказанное на страницах этой книги не дает нам возможности определить понятие разумной деятельности каким-нибудь способом, отличающимся от только что использованного. Разумная деятельность — это деятельность, направленная на создание маловероятных конфигураций. Подобное определение хорошо уже тем, что если его принять, то автоматически отпадает сама постановка вопроса о соревновании между людьми и машинами в области интеллектуальной, т. е. разумной, деятельности. Создавая искусственные системы, использующие в своей работе основные законы кибернетики, человек совершенствует свои способности к управлению. Получается более сложная система, состоящая из машин и людей. Такая система будет тем совершеннее, чем в большей степени каждый из составляющих ее элементов независимо от того, имеет он искусственное или естественное происхождение, окажется приспособленным к выполнению стоящих перед ним частных задач. А вот какими должны быть эти задачи, это и есть предмет исследований науки кибернетики.

Наконец, самое последнее замечание. Хорошая система автоматического управления — это такая система, в которой наилучшим образом создаются условия для протекания процессов управления. В ловушке для мамонтов такие условия создавало мыло. Доказав окончательно, что мыло наряду с прочими персонажами нашей повести может быть с полным правом названо элементом кибернетической системы, авторы с чистой совестью прощаются теперь со своими читателями.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 45 коп.